

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR

Antoine MARSAT

1^{re} THÈSE. — LES AÉROPHARES (PHARES DESTINÉS A LA NAVIGATION AÉRIENNE)

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenu le 1938, devant la Commission d'examen.

17 MAI 1938

MM. FABRY, *Président.*

PAUTHENIER }
CABANNES } *Examineurs.*

Éditions de la *Revue d'Optique théorique et instrumentale*

3 et 5, boulevard Pasteur — 165, rue de Sèvres

PARIS (15^e)

1938

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR

Antoine MARSAT

1^{re} THÈSE. — LES AÉROPHARES (PHARES DESTINÉS A LA NAVIGATION AÉRIENNE)

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le

1938, devant la Commission d'examen.

MM. FABRY, *Président.*

PAUTHENIER }
CABANNES } *Examineurs.*

Éditions de la *Revue d'Optique théorique et instrumentale*

3 et 5, boulevard Pasteur — 165, rue de Sèvres

PARIS (15^e)

1938

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

Doyen honoraire . . . M. MOLLIARD.

Doyen C. MAURAIN, *Professeur*, Physique du Globe

<i>Professeurs honoraires</i>	H. LEBESGUE.	BLAISE.	G. BERTRAND.
	A. FERNBACH.	DANGEARD.	ABRAHAM.
	Emile PICARD.	LESPIEAU.	Ch. FABRY.
	Léon BRILLOUIN.	MARCHIS.	Léon BERTRAND.
	GUILLET.	VESSIOT.	WINTREBERT.
	PÉCHARD.	PORTIER.	DUBOSCQ.
	FREUNDLER.	MOLLIARD	BOHN.
	AUGER.	LAPIQUE.	

PROFESSEURS

M. CAULLERY . . . T	Zoologie (Evolution des êtres organisés).	H. BÉGHIN . . . T	Mécanique physique et expérimentale.
G. URBAIN . . . T	Chimie générale.	FOCH	Mécanique expérimentale des fluides.
Emile BOREL . . . T	Calcul des probabilités et Physique mathématique.	PAUTHENIER . . .	Physique (P. C. B.).
Jean PERRIN . . . T	Chimie physique.	De BROGLIE . . . T	Théories physiques.
E. CARTAN . . . T	Géométrie supérieure.	CHRÉTIEN	Optique appliquée.
A. COTTON . . . T	Recherches Physiques.	P. JOB	Chimie générale.
J. DRACH T	Analyse supérieure et Algèbre supérieure.	LABROUSTE . . .	Physique du Globe.
Charles PÉREZ . . T	Zoologie.	PRENANT T	Anatomie et histologie comparées.
E. RABAUD T	Biologie expérimentale.	VILLEY	Mécanique physique et expérimentale.
M. GUICHARD . . .	Chimie minérale.	COMBES T	Physiologie végétale.
Paul MONTEL . . . T	Théorie des fonctions et Théorie des transformations.	GARNIER T	Mathématiques générales.
L. BLARINGHEM . T	Botanique.	PÉRÈS	Mécanique théorique des fluides.
G. JULIA T	Mécanique analytique et Mécanique céleste.	HACKSPILL	Chimie (P. C. B.).
C. MAUGUIN . . . T	Minéralogie.	LAUGIER T	Physiologie générale.
A. MICHEL-LÉVY . T	Pétrographie.	TOUSSAINT	Technique Aéronautique.
H. BÉNARD T	Mécanique expérimentale des fluides.	M. CURIE	Physique (P. C. B.).
A. DENJOY T	Application de l'Analyse à la Géométrie.	G. RIBAUD T	Hautes températures.
L. LUTAUD T	Géographie physique et géologie dynamique.	CHAZY T	Mécanique rationnelle.
Eugène BLOCH . . T	Physique.	GAULT	Chimie (P. C. B.).
G. BRUHAT T	Physique.	CROZE	Recherches Physiques.
E. DARMOIS . . . T	Enseignement de Physique.	DUPONT T	Théories chimiques.
A. DEBIERNE . . . T	Physique Générale et Radioactivité.	LANQUINE T	Géologie structurale et Géologie appliquée.
A. DUFOUR T	Physique (P. C. B.).	VALIRON	Mathématiques générales.
L. DUNOYER	Optique appliquée.	BARRABÉ	Géologie structurale et géologie appliquée.
A. GUILLIERMOND . T	Botanique.	MILLOT	Biologie animale (P. C. B.).
M. JAVILLIER . . . T	Chimie biologique.	F. PERRIN	Théories physiques.
L. JOLEAUD	Paléontologie.	VAYON	Chimie organique.
ROBERT-LÉVY . . . T	Physiologie comparée.	G. DARMOIS . . .	Calcul des Probabilités et Physique mathématique.
E. PICARD	Zoologie (Evolution des êtres organisés).	CHATTON T	Biologie maritime.
Henri VILLAT . . . T	Mécanique des fluides et applications.	AUBEL	Chimie biologique.
Ch. JACOB T	Géologie.	J. BOURCART . . .	Géographie physique et Géologie dynamique.
P. PASCAL T	Chimie minérale.	M ^{me} JOLIOT-CURIE.	Physique générale et Radioactivité.
M. FRÉCHET T	Calcul différentiel et calcul intégral.	PLANTEFOL	Biologie végétale (P. C. B.).
E. ESCLANGON . . . T	Astronomie.	CABANNES	Enseignement de Physique.
M ^{me} RAMART-LUCAS . T	Chimie organique.	GRASSÉ	Biologie animale (P. C. B.).
		PRÉVOST	Chimie (P. C. B.).

Secrétaire A. PACAUD.

Secrétaire honoraire . . . D. TOMBECK.



A ma femme, à ma fille, à mon fils, Docteur en Médecine, dont la thèse a précédé celle-ci de plusieurs années.

A Monsieur Charles FABRY, membre de l'Académie des Sciences, qui m'a souvent témoigné une vive sympathie et a bien voulu présider cette soutenance. Témoignage de reconnaissance.

A Jean REY, membre de l'Académie des Sciences, Administrateur des Anciens Etablissements Sautter-Harlé, qui m'a montré le chemin, conseillé et encouragé.

A Monsieur Henri HARLÉ, Administrateur des Anciens Etablissements Sautter-Harlé, qui m'a fourni l'occasion et les moyens d'établir cette thèse.

A tous ceux qui, aux Etablissements Sautter-Harlé, m'ont aidé ou encouragé et spécialement à mes jeunes collaborateurs Charles FÉVROT et Jacques LHEUREUX.

LES AÉROPHARES

PHARES DESTINÉS A LA NAVIGATION AÉRIENNE

Par Antoine MARSAT

SOMMAIRE. — *Avant-Propos. Introduction. Court Historique. La loi de Blondel et Rey. Extinction progressive de la lumière. Eclaircissement minimum perceptible. Abaques des portées. Portée maximum d'un feu d'horizon utilisant un flux donné. Portée maximum d'un feu à éclats utilisant un flux donné. Comparaison des éclats longs et des éclats brefs. Probabilité de perception des éclats. Résultats obtenus avec les appareils actuels. Résumé et conclusions.*

Avant-propos.

Les Anciens Etablissements Sautter-Harlé sont les successeurs de François Soleil qui, en 1819, a créé l'industrie des Phares lenticulaires. Lors de mon entrée dans cette maison, au début de 1901, les ateliers de l'avenue de Suffren contenaient un grand nombre de machines provenant de l'ancien atelier de François Soleil, machines étudiées et construites en collaboration avec Fresnel ou reproductions de ces machines.

Je fus chargé en 1904 de l'étude d'une machine destinée au travail des miroirs paraboliques en verre, qui devait reproduire en plus grand la machine pour miroirs de 1 mètre de diamètre installée en 1891.

Le principe de cette machine avait été indiqué par Jean Rey, devenu en 1930 membre de l'Académie des Sciences ; elle avait été étudiée, construite et utilisée sous sa direction immédiate. De là entre nous une collaboration assez étroite pour qu'il nous fût souvent difficile, au bout de quelques années, de préciser la part qui revenait plus spécialement à chacun dans le travail fait en commun : études relatives à la loi de Blondel et Rey, application à la prévision des portées des phares, méthodes de travail ou de contrôle amenant de nouveaux progrès des optiques pour phares et projecteurs, études des sources de lumière et plus spécialement des arcs électriques.

Les travaux en cours à la mort de Jean Rey (25 décembre 1935) ne tardèrent pas à être repris et j'expose ici les résultats auxquels ils m'ont conduit.

Introduction. Court historique.

Pendant longtemps, faute d'appareils plus perfectionnés, les constructeurs de phares se bornent à installer de gros foyers sur le sommet de tours élevées ; le plus souvent, ces foyers sont des tas de combustible, bois, houille,... qui brûlent en produisant beaucoup de fumée.

A la fin du XVIII^e siècle, apparaissent les premières optiques et les feux à éclats qui, en modifiant profondément la répartition du flux, augmentent beaucoup les portées.

Vers 1920, Fresnel crée les optiques lenticulaires, qui permettent d'atteindre des portées beaucoup plus grandes pour la même dépense de combustible dans les lampes. Vers 1890, Bourdelle, avec les Feux-éclairs, réalise un nouveau pas dans la voie d'une meilleure utilisation du flux et un nouvel accroissement des portées. Enfin en 1911, la loi de Blondel et Rey donne le moyen d'évaluer exactement le bénéfice des éclats brefs et montre que l'on peut toujours augmenter la portée d'un feu par une concentration plus poussée du flux.

Jusqu'à cette date, il s'agit de phares maritimes destinés à être perçus par des observateurs placés tous à peu près au même niveau. Il est rarement nécessaire d'augmenter, et cela dans une très faible mesure, la divergence verticale qui résulte des dimensions des sources.

Le problème s'élargit notablement lorsqu'il s'agit de créer des aérophares destinés à la navigation aérienne ; il devient utile, faisant abstraction des détails des appareils, de chercher la meilleure répartition à donner au flux : voici en effet les conditions auxquelles un aérophare doit satisfaire :

Etre visible pour des observateurs placés à des hauteurs très différentes ;

Pouvoir être facilement et sûrement distingué des autres appareils d'éclairage, notamment de ceux qui servent à l'éclairage des villes ;

Présenter une probabilité assez élevée d'être vu par l'aviateur en temps utile, malgré la grande vitesse des avions ;

Etre plus spécialement étudié pour les transparences atmosphériques moyennes où il est utile. Les portées indiquées pour les phares correspondent souvent à des transparences élevées ; en pareil cas, l'aviateur voit assez bien le paysage et il en utilise les grandes lignes pour se repérer. Il compte sur les aérophares par des transparences moins favorables, qui ne lui permettent plus de voir les cours d'eau, les routes, les chemins de fer... Malheureusement, il cesse de les voir à leur tour lorsque la transparence devient très faible.

Les méthodes de calcul exposées plus loin tiennent compte de la transparence atmosphérique, de la hauteur maximum (plafond) prévue pour le vol des avions, de la durée des éclats, du rapport entre la durée des éclats et celle des intervalles obscurs qui les séparent.

La portée de l'aérophare, la durée des éclats, la vitesse de l'avion déterminent le temps total pendant lequel l'observateur peut percevoir un éclat. Ce temps total est l'un des facteurs principaux de la probabilité de perception du feu ; la vitesse élevée des avions ne permet plus de le négliger.

La loi de Blondel et Rey.

Les conditions de perception des éclats lumineux sont l'objet de la loi de Blondel et Rey. Elle fut d'abord considérée comme s'appliquant à la perception des lumières brèves à la limite de leur portée, elle s'applique en réalité au début de la perception, à toutes distances, des lumières fixes ou à éclats. Il n'est pas inutile d'indiquer l'origine des recherches qui ont conduit à cette loi.

En 1920, Fresnel écrivait :

« Malheureusement il est difficile de décider jusqu'à quel point on doit sacrifier l'intensité à la durée ou la durée à l'intensité. »

A cette question, Bourdelle, Directeur du Service central des Phares, avait cru apporter une réponse définitive. Se basant plus spécialement sur les travaux de Charpentier et de Bloch, il avait admis qu'il suffisait de $1/10$ de seconde pour assurer la perception intégrale d'une lumière ; il avait, par ailleurs, établi qu'il fallait, pour la facilité du relèvement, avoir un éclat toutes les 5 secondes.

Malgré le succès des Feux-éclairs, établis d'après ces règles, on ne tarda pas à constater les avantages des éclats de plus longue durée et l'intérêt des éclats moins espacés.

En 1907, le travail des miroirs paraboliques pour projecteurs s'effectuait, dans les ateliers d'optique de MM. Sautter et Harlé, à l'aide d'une came conique et il était aussi facile, en modifiant la position de la came, d'usiner des hyperboloïdes ou des ellipsoïdes que des paraboloides ; Jean Rey ayant décidé de construire des miroirs pour phares, la question se posa de suite de savoir quelle forme on leur donnerait.

Le faisceau d'un réflecteur elliptique ou hyperbolique est divergent dans le sens horizontal, ce qui n'est pas sûrement utile, et dans le sens vertical, ce qui était sans intérêt à l'époque où l'on n'envisageait pas les vols de nuit. Heureusement cette remarque n'empêcha pas les expériences de laboratoire, au programme souvent modifié, qui ont conduit à d'appréciables résultats, notamment à l'abandon de l'idée de construire d'autres miroirs pour phares que des miroirs paraboliques et à une connaissance beaucoup plus complète du processus de la vision des feux fixes et à éclats.

Le premier appareil utilisé permettait de comparer les portées de deux feux de dimensions négligeables dont les intensités et les durées variaient, en sens inverses, dans le rapport de 1 à 2. Aucun observateur, dans aucune expérience, n'a vu un avantage en faveur de l'éclat le plus long. L'apparition des feux et

leur disparition avaient des durées notables, avec cet appareil comme avec ceux des physiciens qui avaient déjà étudié les lumières intermittentes. Petit à petit les appareils modifiés devinrent les modèles décrits dans les notes de Blondel et Rey (1).

L'appareil Rey, dont la figure 1 donne le schéma, est celui qui a donné les meilleurs résultats ; il employait comme sources lumineuses les images aériennes s_1 et s_2 de deux segments voisins du filament de carbone d'une lampe à incandescence S. Près de celle-ci, une pièce de métal portait deux ouvertures D_1 , D_2 , rec-

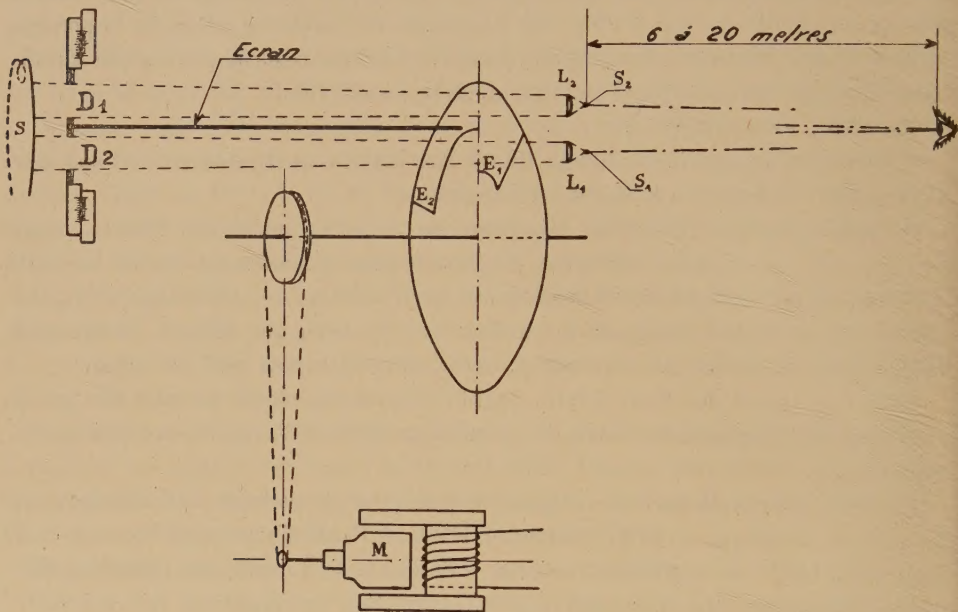


FIG. 1.

tangulaires, de 4 mm de largeur, orientées parallèlement au filament ; deux lamelles permettaient de réduire la longueur de ces ouvertures et par suite de modifier les longueurs des segments du filament utilisés ; des graduations et des verniers permettaient de mesurer facilement ces longueurs en vingtièmes de millimètre. Deux lentilles de 5 mm de distance focale L_1 et L_2 étaient placées à 500 mm de la lampe. Peu en arrière des lentilles, à l'endroit où se serait formée l'image de la pupille de l'observateur, un obturateur constitué par deux disques superposés, munis d'entailles E_1 et E_2 convenables, permettait de laisser passer la lumière de l'un ou des deux segments de filament pendant des temps faciles à calculer à partir de la vitesse de rotation de l'obturateur, dont les disques

(1) Sur la perception des lumières brèves à la limite de leur portée.

portaient l'un une division en degrés, l'autre un repère. L'obturateur, dont les ouvertures avaient toujours une largeur supérieure à 5 mm, masquait ou démasquait les feux en parcourant la plage conjuguée de la pupille de l'observateur placé entre 6 et 20 m de distance ; apparition et disparition avaient des durées assez courtes pour pouvoir être négligées.

L'appareil paraissant au point, on fit intervenir dans 25 essais 17 observateurs dont 2 seulement savaient le but et l'intérêt des expériences.

Au début de chaque essai, on déterminait la durée des feux en donnant les longueurs voulues aux ouvertures de l'obturateur ; celui-ci étant mis en marche, on déterminait l'intensité du feu qui allait servir de témoin, de façon que l'observateur soit près de la limite de portée : lui ayant donné la plus grande valeur possible, on l'affaiblissait jusqu'au moment où les réponses de l'observateur montraient qu'il ne le voyait pas à toutes les apparitions ; l'intensité de l'autre feu, qui avait été masqué jusque là, était alors réglée pour que l'observateur aperçoive aussi souvent un feu que l'autre. Un procès-verbal enregistrait les résultats : durées et intensités des éclats. Les essais terminés, on chercha à les représenter par des courbes : un premier tracé, utilisant les logarithmes des temps, ne permit aucune conclusion ; au contraire, un tracé utilisant les temps eux-mêmes en abscisses et, en ordonnées, les produits Et de l'intensité E et de la durée t , montra de suite que les divers points se plaçaient à peu près en ligne droite. Ce résultat donnait raison à M. Blondel, qui affirmait déjà que la loi de Bloch $Et = Ct^e$ devait être remplacée par une loi plus complexe, à laquelle il attribuait la forme : $(E - E_0) t = Ct^e$, où E est l'éclairement reçu par la rétine, E_0 l'éclairement minimum perceptible et t la durée de l'éclairement. Cette forme résulte de l'existence d'un seuil pour l'excitation, qui occasionne une perte proportionnelle au temps, et d'un seuil pour la sensation, qui exige une certaine énergie.

La droite sur laquelle se placent les points représentant les expériences coupe l'axe des X au point $x = -0,21$ et son équation est de la forme $Et = A + Bt$. La constante B est la valeur de l'éclairement minimum E_0 juste capable de produire la sensation après un temps d'action infini (cette durée d'éclairement est évidemment en dehors de nos possibilités de réalisation). La constante $A = 0,21 E_0$ s'obtient en faisant $Et = 0$. L'équation est donc :

$$Et = 0,21 E_0 + t E_0 = E_0 (t + 0,21).$$

Le coefficient 0,21 résultant de la moyenne des résultats, on obtiendrait une valeur un peu différente pour chaque observateur et, d'une manière générale, on aurait : $Et = E_0 (t + a)$.

Dans beaucoup de cas, on a substitué aux éclairements E et E_0 les intensités I et I_0 qui produisent ces éclairements et l'on a écrit : $It = I_0 (t + a)$ et $I_0 = I \frac{t}{t + a}$.

Les expériences effectuées avec l'appareil Blondel ont confirmé les résultats obtenus avec l'appareil Rey.

Dans un article paru le 15 juillet 1916 dans *La Lumière électrique*, Blondel et Rey mentionnent des expériences effectuées en 1914, en plein air, sur une distance de 7 km : un éclat bref de durée $1/465$ de seconde était aussi visible à la limite de portée qu'un éclat durant $1/11$ de seconde utilisant un flux lumineux double ; il suffisait d'interposer devant l'œil une glace plane absorbant 10 % pour cesser de voir les feux. Cet article relate également des expériences déjà mentionnées par Blondel dans une note présentée à l'Académie des Sciences le 17 avril 1916 ; il donne les résultats obtenus avec un nouvel appareil auquel était assurée une grande précision par l'emploi d'une pupille artificielle et d'un léger éclairage qui permettait à l'observateur de placer l'œil dans la direction où le feu allait apparaître et d'accommoder sur des objets placés à la même distance.

Dès le 20 novembre 1918, les essais étaient repris et les notes d'expériences montrent qu'il a été fait plus de 20 000 (vingt mille) observations.

On avait construit un nouvel appareil dont la figure 2 donne le schéma : on employait encore, comme source de lumière, l'image réelle donnée, par une lentille L_e de très courte distance focale, d'un segment du filament droit d'une lampe à incandescence L_a . Cet appareil émettait successivement trois éclats d'intensités i et de durées t variables, mais de produit it constant. Un enregistreur M marquait un point sur une bande de papier chaque fois que l'observateur voyait un éclat et ce point se plaçait à une hauteur différente selon l'éclat perçu ; à la fin de l'essai, le nombre de points indiquait, pour chaque éclat, le nombre de fois qu'il avait été vu, la longueur de la bande donnait le nombre de fois qu'il avait eu lieu. Chaque fois qu'un éclat allait se produire, un timbre avertissait l'observateur qui occupait l'une des positions $A, A_1, A_2, \dots A_n$, espacées de 0 m, 50, la première étant à 6 m et la dernière à 20 m de l'appareil. Chaque position était repérée par un support muni d'un bouton de commande B de l'enregistreur et de deux glaces planes G absorbant chacune 10 %. L'observateur, placé d'abord en A , franchissait rapidement les positions où il voyait tous les éclats, puis il restait 1 à 2 minutes à chacune des positions où il ne voyait qu'une partie des éclats ; l'essai était terminé lorsqu'il avait franchi deux positions consécutives sans percevoir aucun éclat.

Jean Rey a montré dans une note présentée à la Réunion officieuse des Chefs de Service de l'Eclairage et du Balisage (Londres, juillet 1929) que cette longue série d'essais confirme l'exactitude de la loi de Blondel et Rey pour toutes les distances où le feu est assez faible pour ne pas être vu toutes les fois qu'il paraît par un observateur qui en connaît la position et se trouve averti, par un coup de timbre, du moment où le feu va paraître.

De nombreux savants, cités par Blondel et Rey dans leurs notes de 1911, avaient étudié la variation des impressions lumineuses en fonction du temps.

Blondel et Rey, contrairement à leurs devanciers, ont limité leurs recherches à l'action de la lumière sur l'œil juste nécessaire pour produire le début de la sen-

sation. Ils ont étudié l'action de la lumière sur l'œil dans la période, longue parfois de plusieurs secondes, qui précède le seuil de perception.

Ils ne se sont pas occupés de la valeur qu'elle peut prendre lorsque l'éclat se

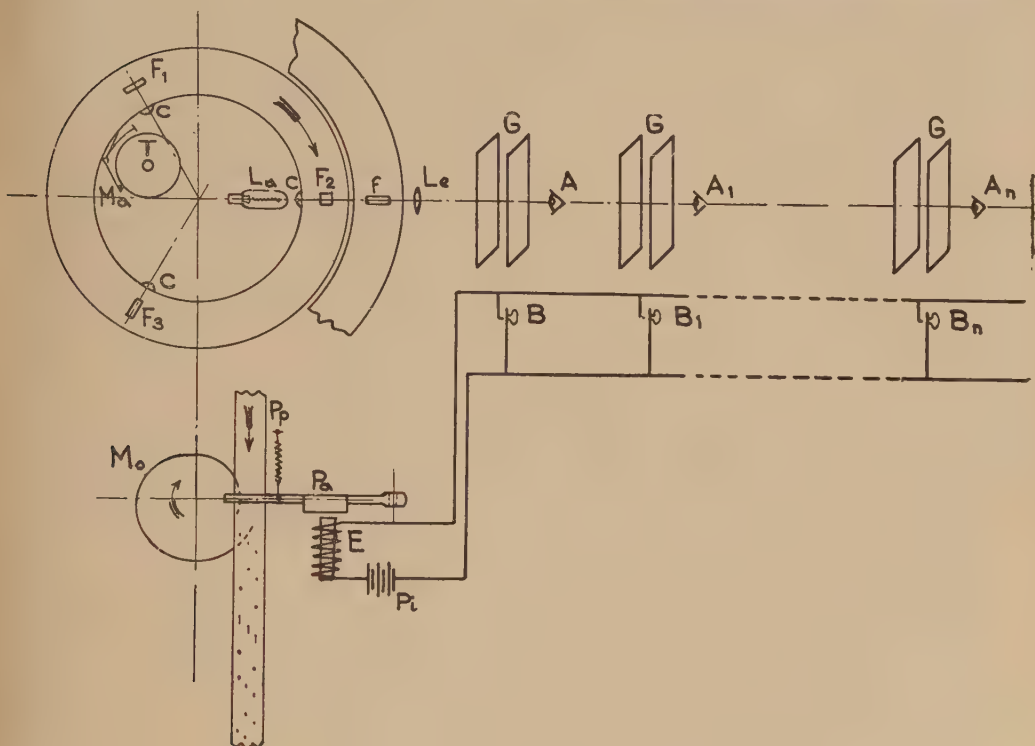


FIG. 2. — Loi de Blondel et Rey.

Schéma de l'appareil utilisé pour les expériences de 1919 à 1922.

- A, A₁, A_n Positions successives de l'opérateur.
- B, B₁, B_n Boutons de commande de l'enregistreur.
- C Cames attaquant le marteau de la sonnette.
- E Electro-aimant de l'enregistreur.
- F₁, F₂, F₃ Fenêtres du cylindre mobile.
- F Fenêtre du cylindre fixe.
- La Lampe à filament rectiligne.
- Le Lentille de très courte distance focale.
- Ma Marteau de la sonnette.
- Mo Molette en spirale.
- Pa Palette de l'enregistreur.
- Pi Source de courant pour les boutons B et l'électro-aimant E.
- Pp Bande de papier enregistreur.
- T Timbre de la sonnette.
- G Glaces absorbant 0,1 de la lumière.

prolonge. La loi qu'ils ont trouvée est valable non seulement pour l'observateur placé à la limite de portée d'un feu à éclats, mais aussi pour l'observateur placé à une distance quelconque du feu ; elle permet alors de déterminer le temps qui s'écoule entre le début de l'éclairement de l'œil et le moment où la lumière com-

mence à être perçue. Elle permet, par suite, d'évaluer la durée réduite d'un éclat, qui est l'un des facteurs importants de la probabilité de perception.

Il semble bien que leurs prédécesseurs n'aient pas attaché une attention suffisante à cette partie essentielle du phénomène ; ainsi Allard (1), dans son étude théorique de la vision des feux scintillants, précise que l'impression persiste après l'extinction du feu et cesse d'être perceptible avant d'être complètement nulle, mais il ne fait aucune allusion au fait cependant aussi probable que l'impression doit exister un certain temps avant la sensation.

Les éclats de phares n'ont pas une intensité constante, leur apparition et leur disparition sont très progressives ; à première vue, la loi trouvée ne peut leur être appliquée. A chaque instant et quelle que soit la valeur de E , l'excitation utile est la différence entre l'éclairement réel E et l'éclairement minimum E_0 qui est une propriété caractéristique de l'œil ; dans le cas d'un éclat de phare produisant des éclairagements sur la pupille dont on connaît la loi en fonction du temps, on pourra substituer à $(E - E_0)t$ l'intégrale $\int_t^{t_1} (E - E_0) dt$, t et t_1 marquant les instants où la valeur de E atteint la valeur E_0 dans sa montée et dans sa descente. La durée de l'éclat dont on tient ainsi compte n'est pas la durée totale ; cette durée réduite rappelle l'amplitude nominale envisagée par Ribière (2), mais elle n'est pas une fraction constante de la durée totale, elle doit être déterminée dans chaque cas particulier.

Les travaux de Blondel et Rey ont précisé les détails de la perception des feux à la limite de leur portée :

le début et la fin de leur action sur l'œil dépendent uniquement des mouvements de l'œil dans le cas d'un feu de longue durée ; ils dépendent de la durée des éclats et des mouvements de l'œil lorsqu'il s'agit d'un feu à éclats ;

le seuil de la sensation est atteint lorsque l'action sur l'œil a duré un certain temps, qui dépend de l'intensité reçue par la rétine. La loi de Blondel et Rey exprime la relation qui existe entre l'intensité de l'éclairement de la rétine et la durée nécessaire pour atteindre le seuil ;

lorsque le seuil a été atteint, l'observateur peut facilement (si la lumière n'est pas aveuglante) maintenir son œil dans la direction du feu et la sensation peut, comme l'ont montré Broca et Sulzer (3), prendre des valeurs supérieures à λ , éclairement minimum perceptible ;

la durée de l'éclat détermine le temps maximum de l'action sur l'œil d'un feu à éclats et l'on peut évaluer sa portée en fonction de cette durée ; cependant, si la durée de l'éclat est supérieure au temps pendant lequel l'œil de l'observateur reste en direction d'un feu avant de le percevoir (temps maximum d'attente), la portée ainsi déterminée n'aura en pratique guère de valeur ;

(1) Allard, *Mémoire sur l'intensité et la portée des phares*, pages 62 et la suite.

(2) Ribière, *Phares et signaux maritimes*, page 182.

(3) Broca et Sulzer, *Sensation lumineuse en fonction du temps*.

il n'y a plus d'hésitation lorsqu'il s'agit d'un feu de très longue durée (feu fixe) : seul pourra être pris en considération le temps maximum d'attente dont la valeur moyenne est fort mal connue ; ce temps a joué dans toutes les déterminations de λ et, comme il a des valeurs très différentes selon les observateurs, il y a là une cause notable de divergence dans les résultats obtenus ; il serait désirable qu'il soit indiqué au moins approximativement ;

tout feu dont les éclats ont une durée supérieure au temps maximum d'attente a la même portée que les feux fixes d'égale intensité photométrique ; cette considération évite beaucoup de calculs ;

il ne faut jamais oublier que t , temps réel d'action qui figure dans la loi de Blondel et Rey, est au plus égal à la durée de l'éclat ou au temps maximum d'attente et qu'il peut prendre toutes valeurs plus petites.

Extinction progressive de la lumière.

La portée des phares dépend d'abord de l'extinction progressive de la lumière et de l'intensité apparente du feu le plus faible que l'on puisse percevoir dans les conditions où se fait l'observation.

L'extinction de la lumière, en fonction de la distance qui sépare l'observateur et le phare, résulte d'abord de son étalement régulier proportionnel au carré de la distance, puis, en très faible quantité, de son absorption par l'air lui-même et surtout de la diffusion, de la réflexion et de l'absorption par les corps que l'air tient en suspension : poussières en tous genres, gouttelettes d'eau, etc. La loi des carrés joue à toutes distances, même petites, elle a naturellement été étudiée la première ; sauf le cas du brouillard, les autres causes ne prennent d'importance que sur des distances notables et les ingénieurs des Services des Phares furent les premiers à s'en occuper.

Au milieu du siècle dernier, dans le but de donner aux navigateurs des indications plus exactes sur la portée des phares du littoral français, l'Administration française décida de faire exécuter par son personnel des observations de visibilité. Dans ce but, trois fois par nuit, à heures fixes, les gardiens durent noter les phares voisins qu'ils voyaient. Pour coordonner les renseignements ainsi obtenus, Reynaud et Allard (1) utilisèrent une formule souvent désignée sous le nom de loi d'Allard :

$$\lambda = \frac{L a^x}{x^2} ,$$

λ désigne l'éclairement minimum perceptible ;

L , l'intensité photométrique du phare ;

(1) Reynaud, *Mémoire sur l'éclairage*, page 18.

a , le coefficient de transparence atmosphérique par kilomètre ;
 x , la distance de l'observateur au phare.

Cette formule combine la loi des carrés des distances et l'hypothèse d'une atmosphère homogène où le flux lumineux subirait la même perte proportionnelle chaque fois qu'il traverse une même épaisseur. Il est possible que Reynaud et Allard aient senti que cette hypothèse était assez éloignée de la réalité, mais ils n'y ont pas fait allusion dans leurs écrits ; elle leur permettait d'utiliser une formule simple, qui se prêtait à des calculs faciles, surtout en utilisant le tableau graphique (1) donné par Allard, qui l'appellerait aujourd'hui un abaque.

L'enquête montrait que, le même jour, à la même heure, la transparence était différente en diverses régions du littoral, souvent assez voisines. Reynaud et Allard ne pouvaient en conclure qu'elle restait constante sur toute la distance séparant deux phares. L'expérience faite en 1915 aux environs de Paris, au Christ de Saclay, montre bien cette variation de la transparence. Un projecteur de 1 m, 20 éclairait deux postes photométriques placés en ligne droite à 1 et 2 kilomètres.

Quelle que soit la distance, on peut toujours écrire :

$$e = \frac{I \cdot a^x}{x^2} ,$$

relation dans laquelle e désigne l'éclairement produit à la distance x par une source lumineuse d'intensité photométrique I , pour une transparence atmosphérique a .

Ayant mesuré les éclairéments e_1 et e_2 produits par le projecteur à 1 et 2 kilomètres, il paraît facile de déterminer l'intensité photométrique du projecteur et le coefficient de transparence par kilomètre.

Après plusieurs séances consacrées à mettre au point les détails d'une expérience, à laquelle ne prenaient cependant part que des observateurs très entraînés, le 15 octobre, trois séries de mesures donnèrent les résultats suivants :

$e_1 = 20,6$ lux	$e_2 = 4,7$ lux	$a = 0,912$	$I = 22\ 600\ 000$ bougies
15,5	2,64	0,684	22 700 000
8,4	2	0,95	8 850 000

Avant chaque lecture, on s'assurait que le cratère était au foyer et l'arc au régime prévu : 120 ampères et 65 volts. Le procès-verbal précise qu'il pleuvait au moment du deuxième essai et qu'il y avait du brouillard au voisinage du projecteur lors du troisième. Les mesures faites au cours de ce dernier confirment que la transparence était moins élevée sur le premier kilomètre, comme le faisait prévoir la présence du brouillard ; leur comparaison avec les résultats des autres

(1) Allard, *Tableau graphique des portées. Mémoire sur l'intensité et la portée des phares.*

essais montre que la transparence était voisine de 0,3 par kilomètre, entre le projecteur et le premier poste, au lieu de 0,95 sur le deuxième kilomètre.

Les observations de visibilité des gardiens de phares révèlent que, dans le plan vertical et sur de grandes distances, la lumière ne se propage pas en ligne droite et que la déviation varie d'un jour à l'autre ; leur ensemble accuse une variation saisonnière. Ce phénomène a été étudié à nouveau par les services du Ministère de l'Air. Ces études ne montrent pas qu'il y ait là une cause d'extinction sensible de la lumière.

Des expériences ont paru montrer que la loi d'extinction progressive de la lumière variait en fonction de l'ouverture des faisceaux et, dans un même faisceau, n'était pas la même sur l'axe, au bord ou dans une direction intermédiaire.

Ces expériences (1) ont été faites en plein air, sur d'assez grandes distances, les mesures ont été effectuées avec beaucoup de soin par plusieurs observateurs dont l'impartialité ne peut être contestée.

Un projecteur de 1 m, 20 éclairait deux postes d'observation placés à 800 et 2 000 mètres ; on a mesuré d'abord les éclairissements produits sur l'axe du faisceau, puis, à droite et à gauche, à 6, 14 et 18 millièmes. Plusieurs mois après, on a calculé, à l'aide de la formule d'Allard, la valeur de a pour chacune des directions où l'on avait fait des mesures et l'on a constaté que cette valeur maximum sur l'axe du faisceau diminuait fortement au fur et à mesure que l'on s'écartait de l'axe. Voici les valeurs obtenues :

sur l'axe	$a = 0,87$	$I = 86 \times 10^6$ bougies
à 6 millièmes	0,86	84
à 14 millièmes	0,80	72
à 18 millièmes	0,65	67

La variation de la loi d'extinction de la lumière en fonction de l'ouverture du faisceau a été vérifiée par de nombreuses expériences de laboratoire, dont aucune, prise isolément, n'est absolument probante, elle ressort nettement de ce qui se passe lorsqu'un mince pinceau de lumière traverse un local obscur. Les poussières en suspension dans l'air s'illuminent ; si le pinceau est dû à une lumière assez intense, on constate un éclairement net des parois du local. Si l'on compare le flux à l'entrée et le flux reçu par la partie de la paroi qui, par contraste, semble d'abord seule illuminée, on constate une perte due à la lumière absorbée par l'air et transformée en chaleur et aussi à la lumière diffusée par l'air pour produire l'éclairement de toutes les parois.

Un deuxième faisceau admis dans le même local agira de même et augmentera, légèrement il est vrai, l'éclairement de la tache due au premier ; cet éclairement deviendra d'autant plus élevé que le nombre des autres faisceaux sera plus grand.

(1) A. Marsat, tome 5 du *Bulletin de la Société française des Electriciens*, p. 122.

Ce qui est vrai pour des faisceaux de toutes directions reste vrai pour les faisceaux élémentaires que l'on peut isoler par la pensée dans un faisceau d'ouverture quelconque.

La conclusion de l'étude est en faveur des faisceaux de grande ouverture ; elle ne pourrait être beaucoup modifiée par l'emploi d'une loi, plus compliquée que la loi d'Allard, qui tiendrait compte de toutes les causes d'affaiblissement de la lumière, notamment de celle que les faisceaux étroits s'éteignent plus vite.

Eclairement minimum perceptible.

Reynaud et Allard firent de nombreuses expériences pour déterminer la valeur de l'éclairement minimum perceptible et ils adoptèrent pour cette valeur, l'éclairement sur la pupille produit par une lampe carcel placée à 1 myriamètre de l'observateur ; cette unité de distance peu usitée donnait à la valeur numérique de λ la forme la plus simple $\lambda = 1$. Ils ont publié les mesures faites au cours de leurs expériences et reproduit dans leurs ouvrages l'épure qui leur a permis de déterminer λ .

Chaque séance, pendant laquelle la transparence a peu varié, comportait la détermination de la portée de plusieurs lumières dont on connaissait les valeurs en carcels. L'épure est basée sur la traduction en logarithmes de la loi $\lambda = L \frac{a^x}{x^2}$: $\log \lambda = \log \frac{L}{x^2} + x \log a$. Les abscisses étant proportionnelles aux distances x et les ordonnées proportionnelles à $\log \frac{L}{x^2}$, les points se trouvent sur une droite d'inclinaison $\log a$, qui coupe l'axe des Y au point $y = \log \lambda$.

La figure 3 est la reproduction de l'épure telle qu'elle figure à la page 16 de l'ouvrage de Reynaud (1). L'examen même rapide de cette épure suffit à révéler qu'aucune des droites résumant chacune une expérience ne suit la direction moyenne des groupes de points.

Si l'on trace des droites qui représentent mieux ces directions moyennes, elles déterminent pour λ une valeur très voisine de 0,18. Si l'on prend les unités habituelles : le mètre et la bougie, λ s'écrit $0,1 \cdot 10^{-6}$ et sa valeur corrigée $0,18 \cdot 10^{-6}$. Il est plus commode d'utiliser le kilomètre comme unité de distance ou de parler de microlumens.

Depuis Allard, beaucoup d'expérimentateurs ont cherché à déterminer la valeur de λ ; les astronomes notamment lui ont trouvé des valeurs notablement plus faibles ; par contre Jean Rey a indiqué une valeur plus élevée, $\lambda = 0,3$. Elle résulte de l'interprétation par la méthode de Reynaud et Allard des portées indi-

(1) Reynaud, *Mémoire sur l'éclairage et le balisage des côtes de France*.

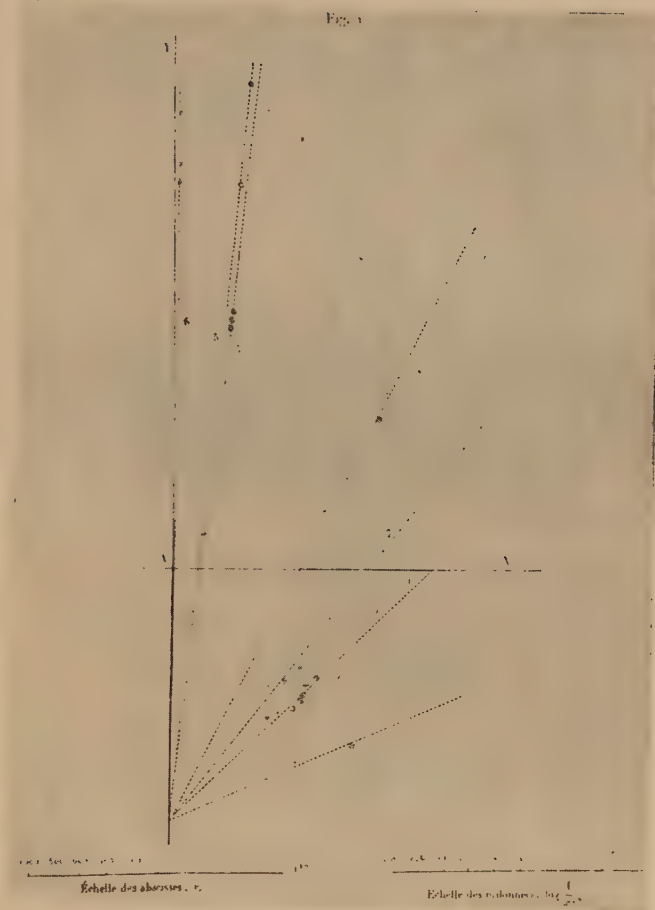


FIG. 3.

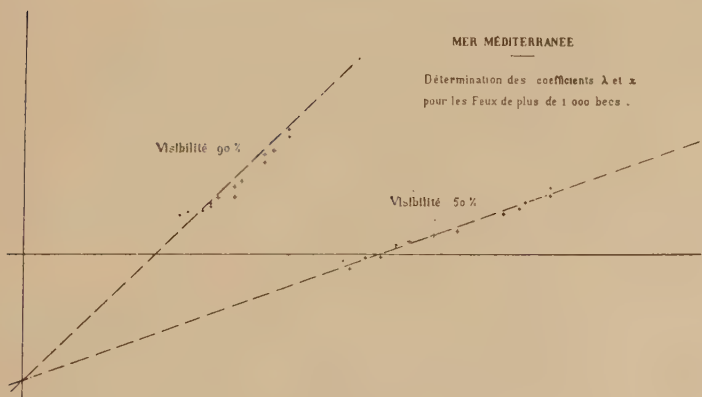


FIG. 4.

quées en 1910 par l'*Etat de l'Eclairage* publié par l'Administration des Phares et Balises.

La figure 4 reproduit l'épure qui figure à la page 81 de l'ouvrage de J. Rey (1).

Le Service des Etudes et de la Signalisation du Ministère de l'Air utilise actuellement un abaque qui indique différentes valeurs de λ , dont $\lambda=1$ (Aéronautique).

La loi de Blondel et Rey montre que la valeur 0,3 trouvée en se basant sur les portées de feux-éclairs ayant tous des durées d'éclats voisines de 0,4 seconde implique une valeur de 0,2 pour les durées d'éclats très longues.

Cette même valeur se retrouve en partant de la valeur admise par l'aéronautique si l'on admet, ce qui est très vraisemblable, que, pour les aviateurs, le temps maximum d'attente est de 0,05 seconde. Les diverses valeurs de λ admises pour les phares ne s'opposent donc pas, comme il le semblerait au premier abord ; bien au contraire, elles se confirment. On voit combien il est nécessaire, chaque fois que l'on indique une valeur de λ , de spécifier la durée correspondante du temps maximum d'attente.

Abaques des portées.

Exprimée entièrement en logarithmes, la loi d'Allard s'écrit :

$$\log \lambda = \log L + x \log a - 2 \log x$$

et il est facile de construire des abaques qui rendent les calculs aisés et rapides.

Le premier en date est le tableau graphique des portées qui figure à la fin de l'ouvrage d'Allard (2).

Ce tableau, malgré la perfection de l'impression, est assez difficile à lire ; Jean Rey a donné en 1913 un abaque d'aspect plus plaisant, qui nécessite, en chaque cas, le tracé d'une parallèle à l'une des droites qui correspondent chacune à l'une des quatre régions du littoral et à la probabilité dans le temps de 0,5 ou de 0,9 (3).

En 1922, il a indiqué un abaque à points alignés qui exige une règle ou un fil tendu (4) et en 1923, un abaque qui n'a pas ces servitudes, mais comporte de nombreuses lignes courbes qui en rendent le tracé assez délicat.

M. André Blondel a publié en 1931 un abaque à points alignés (5) d'un emploi plus facile que l'abaque d'Allard ; il ne comporte que des lignes droites.

Enfin, en 1936, est paru un abaque ne comportant également que des lignes droites, d'une lecture aisée et dont les repères de construction rendent le tracé des plus faciles. La figure 5 indique, de façon schématique, le tracé de ce nouvel

(1) Jean Rey, *Notice sur un nouveau système de phares à réflecteurs métalliques*.

(2) Allard, *Mémoire sur l'intensité et la portée des phares*, Paris.

(3) Jean Rey, *Portée obtenue avec un phare de grand atterrage*.

(4) Jean Rey, *Notice sur un nouveau système de phares à réflecteurs métalliques*.

(5) *Proceedings of the International Illuminating Congress*, 1931.

abaque. A la partie gauche de la ligne inférieure, on trouve les valeurs, comprises entre 0,1 et 1, admises pour λ , c'est-à-dire les intensités photométriques des sources qui, dans chaque cas, sont considérées comme les plus faibles qui puissent être aperçues à 1 kilomètre pour une transparence parfaite, $a = 1$.

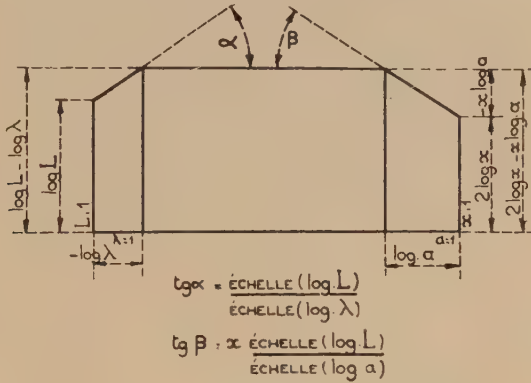


FIG. 5.

La figure 6 montre une modification de cet abaque qui permet de tenir compte de deux valeurs différentes de l'absorption s'appliquant chacune à une partie de la distance.

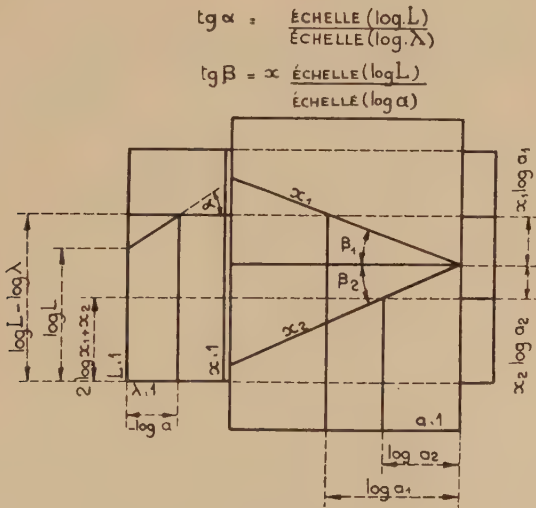


FIG. 6.

Si l'on était encore réduit aux sources à flammes ou aux manchons incandescents qui en avaient reproduit la forme, si l'on devait se contenter des optiques créées par Fresnel, il pourrait paraître inutile ou au moins prématuré de chercher comment réaliser la meilleure répartition du flux, l'on n'aurait aucun moyen d'y

parvenir. Les progrès rapides faits dans le travail des surfaces polies, les formes variées des sources de lumière rendent, au contraire, cette recherche nécessaire.

La précision chaque jour croissante du travail des métaux permet d'établir des calibres très exacts et d'usiner facilement des formes nouvelles, notamment tous les corps de révolution.

Fresnel avait d'abord subi la nécessité d'établir en plusieurs morceaux ses anneaux lenticulaires, l'appareil d'éclairage des berges du Canal Saint-Martin lui avait permis de montrer le parti que l'on pouvait tirer de la segmentation ; par application de ce principe, de nombreux problèmes ont été résolus par l'emploi de réflecteurs segmentés.

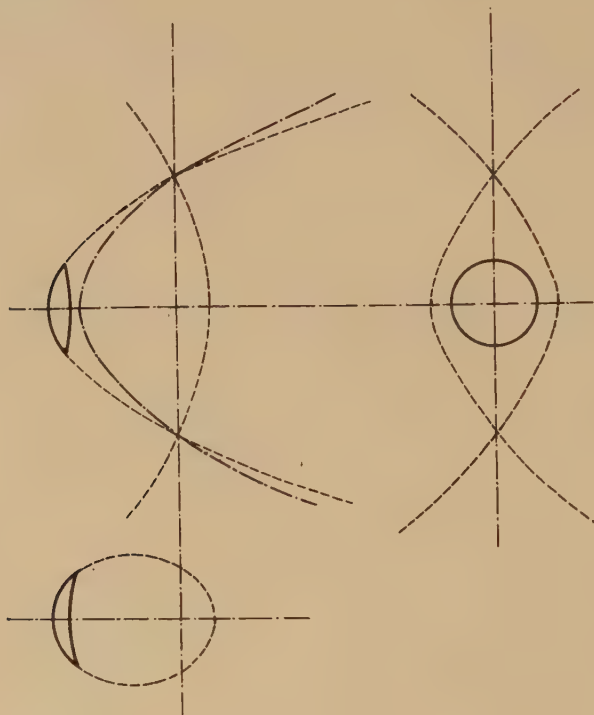


FIG. 7.

On a construit des réflecteurs parabole-ellipse dont la figure 7 indique la forme en traits pleins, le tracé en pointillé indiquant la surface à trois nappes dont le réflecteur est une calotte. On a combiné un tore parabolique et un cylindre à directrice parabolique ; on a utilisé un tore dont la méridienne est une parabole ayant pour paramètre le rayon du tore à son équateur. Enfin on a créé des réflecteurs qui donnent des feux à éclats (fig. 8) et des feux d'horizon (fig. 9) qui, dans le cas d'une source de dimensions négligeables, utiliseraient sans pertes par occultation la totalité du flux émis par la source.

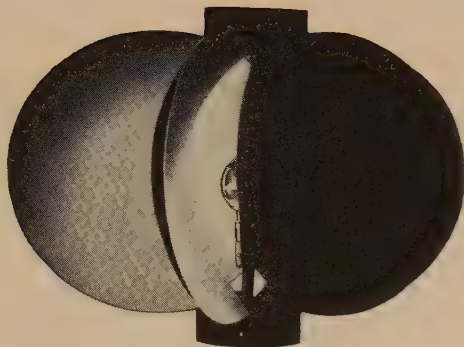


FIG. 8.

152952

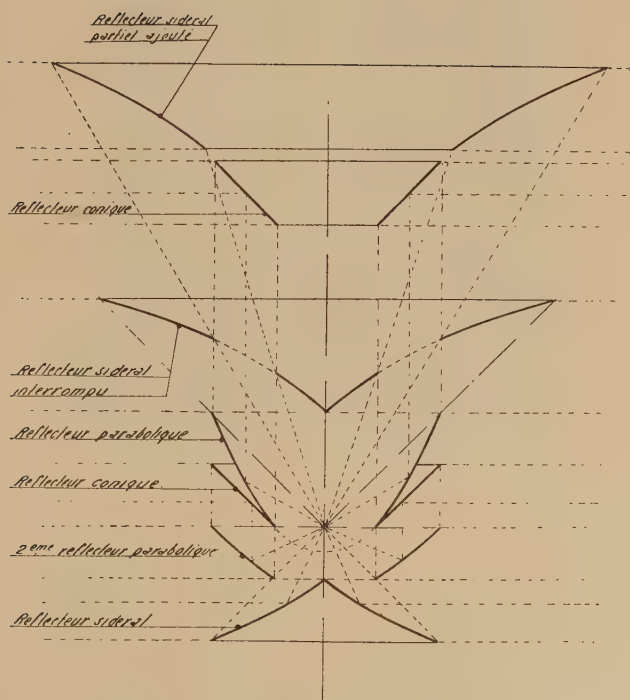


FIG. 9.

Du côté des sources lumineuses, l'emploi d'une spirale de fil de tungstène à simple ou double boudinage permet de créer un grand nombre de formes de corps éclairants : selon la répartition cherchée, on emploiera une forme générale cylin-

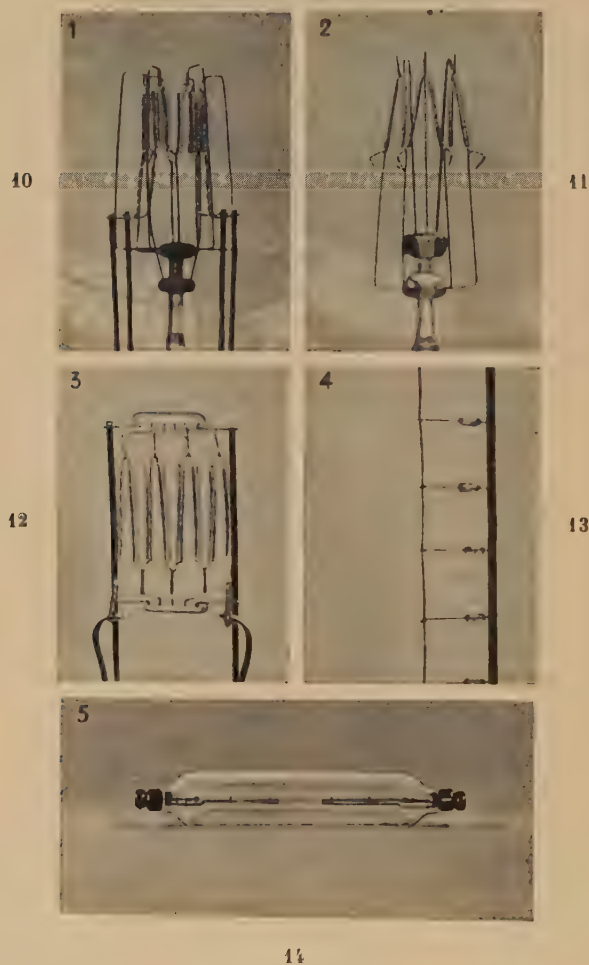


FIG. 10, 11, 12, 13, 14.

drique (fig. 10) d'assez fort diamètre, une forme tronconique (fig. 11), une grille plate (fig. 12) ou même une longue ligne brillante (fig. 13). Cette forme de trait de feu vient de trouver une réalisation presque parfaite dans certaines lampes à vapeur de mercure à très haute pression (lampe Bol, fig. 14).

Portée maximum d'un feu d'horizon utilisant un flux donné.

Les phares maritimes visibles en toutes directions sont appelés le plus souvent des feux d'horizon, quelquefois aussi des feux fixes ; cette désignation ne semble pas la mieux appropriée, car un feu à éclats qui ne tourne pas est incontestablement un feu fixe, mais il n'est pas visible en toutes directions. Aucun aérophare ne peut avoir pour rôle d'éclairer seulement l'horizon, il est au contraire nécessaire qu'il soit visible sur une grande hauteur ; néanmoins il semble logique, par assimilation, de l'appeler feu d'horizon et non feu fixe.

Un tel feu doit être vu à la même distance horizontale du phare, quelle que soit la hauteur à laquelle vole l'avion ; il faut de plus que l'aviateur ne puisse le perdre de vue lorsqu'il s'en rapproche.

Quand l'on a fixé la hauteur maximum (plafond) à laquelle se trouveront les navigateurs qui doivent voir le feu, quand l'on a choisi les valeurs les plus convenables pour l'éclairement minimum perceptible et pour la transparence atmosphérique, il est facile de calculer par points la courbe polaire des intensités lumineuses qui seraient nécessaires. Mais si on veut la tracer, on est bien vite arrêté dans le choix de l'échelle par le trop grand écart entre les différents vecteurs ; de plus, comme on le sait, l'aire limitée par la courbe des intensités n'est pas proportionnelle au flux. L'épure de Rousseau donne une aire proportionnelle au flux, mais elle laisse subsister l'inconvénient des vecteurs trop différents.

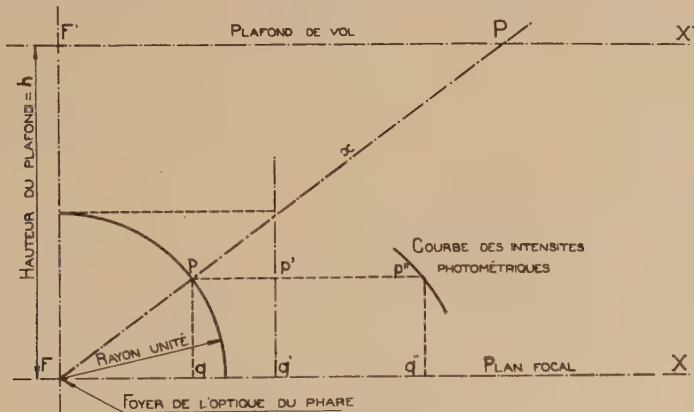


FIG. 15.

D'autres modes de représentation de ce flux sont possibles ; on écarte de suite l'échelle logarithmique, qui détruirait la proportionnalité de l'aire et du flux. Voici une épure plus satisfaisante.

La figure 15 est tracée dans un plan vertical passant par l'axe du phare,

FX est la trace du plan focal (plan horizontal passant par le foyer);

F'X' est la trace du plafond, plan horizontal au-dessus duquel il n'y a plus d'avions ;

P, un point de la ligne F'X' ;

x , la distance OP mesurée en kilomètres ;

a , la transparence atmosphérique par kilomètre ;

h , la hauteur du plafond exprimée en kilomètres.

Pour tracer la courbe polaire des intensités, il faut porter sur la ligne FP une longueur égale à :

$$\lambda \cdot x^2 \left(\frac{1}{a} \right)^x$$

Pour l'épure de Rousseau, on portera cette même longueur à partir du point p' parallèlement à FX. Le rayon du cercle utilisé pour le tracé de l'épure étant pris pour unité, la longueur $p'q'$ a pour valeur $\frac{h}{x}$, dont la différentielle est $-\frac{h}{x^2} dx$.

Chacun des petits rectangles élémentaires, dont la somme est égale au flux en lumens divisé par 2π , a pour surface : $-h\lambda \left(\frac{1}{a} \right)^x dx$.

Cette expression se prête à une intégration facile et il aurait sans doute paru inutile d'en chercher une représentation graphique, si l'on n'avait eu, dès le début, l'idée de modifier l'épure de Rousseau en s'inspirant de la méthode de Lambert qui permet, en cartographie, d'obtenir des projections à aire conservée, dont l'utilité en éclairagisme a déjà été montrée (1).

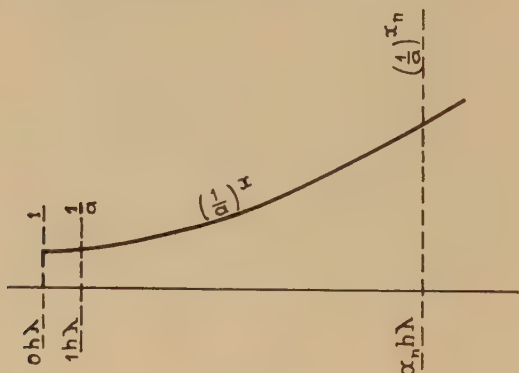


FIG. 16.

On peut substituer à l'épure de Rousseau une nouvelle épure où les abscisses seront λx et les ordonnées $\left(\frac{1}{a} \right)^x$ (fig. 16).

Dans les phares, les portées de l'ordre de 100 km sont souvent à envisager et,

(1) Voir notamment A. Marsat, *Sur les modes de représentation graphique de la répartition du flux émis par une source lumineuse*.

dans ce cas, il est intéressant de diviser l'ordonnée par 100^2 sans que l'abscisse devienne, de son côté, exagérément grande.

Si le point P est le point le plus éloigné d'où le feu doit être aperçu et si celui-ci doit être aperçu à la même distance dans tout l'angle PFX, le flux correspondant est proportionnel à :

$$\lambda . h . x . \left(\frac{1}{a} \right)^x ,$$

qui représente la surface d'un rectangle de côtés :

$$\lambda h x \quad \text{et} \quad \left(\frac{1}{a} \right)^x$$

ayant par conséquent pour hauteur l'ordonnée maximum du quadrilatère représentant le flux utilisé dans l'angle PFF' et une base un peu plus grande. La majeure partie du flux est utilisée dans l'angle PFX ; la partie employée dans l'angle PFF' est proportionnelle à :

$$\lambda h \int_h^x \left(\frac{1}{a} \right)^x dx = \lambda h \frac{1}{\text{Log} \frac{1}{a}} \left[\left(\frac{1}{a} \right)^x - \left(\frac{1}{a} \right)^h \right].$$

En négligeant $\frac{1}{\text{Log} \frac{1}{a}} \left(\frac{1}{a} \right)^h$, qui est le plus souvent très petit, le rapport

entre le flux utilisé dans l'angle AFX et celui qui est utilisé dans l'angle AFF' prend pour valeur approchée :

$$\frac{x}{\text{Log} \frac{1}{a}} .$$

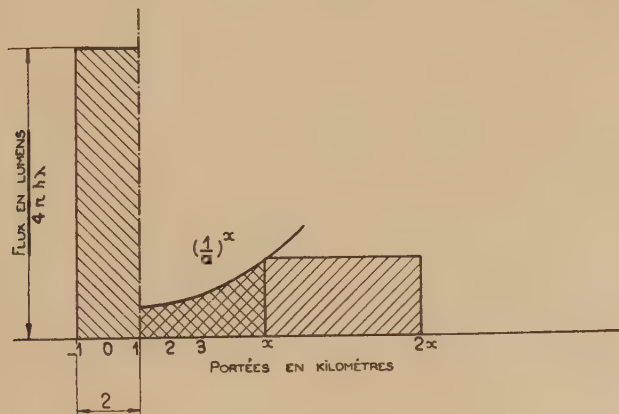


FIG. 17.

Dans les premiers tâtonnements, on peut ne s'occuper que de la partie la plus importante.

De plus on peut ramener le calcul à ce qu'il serait pour $\lambda = 1$ et $h = 1$ en divisant le flux par $\lambda \cdot h$.

La figure 17 représente côte à côte : le rectangle du flux de l'épure de Rousseau (hauteur égale au flux en lumens divisé par $4 \pi \lambda h$, base égale à 2, diamètre de la sphère de rayon unité) ; le quadrilatère (ayant un côté courbe) proportionnel au flux utilisé dans l'angle PFF' ; le rectangle proportionnel au flux utilisé dans l'angle PFX. Le rectangle du flux (à gauche) a une surface égale à la somme des surfaces des deux autres figures ; il a fallu par tâtonnements chercher la position du point x qui satisfait à cette condition.

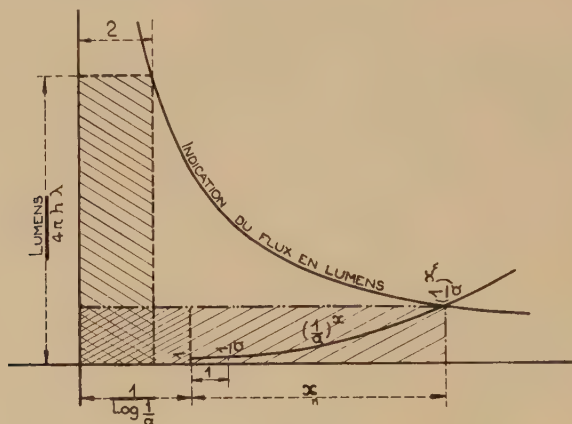


FIG. 18.

La figure 18 est obtenue en remplaçant le quadrilatère ayant un côté courbe par un rectangle équivalent (on a admis que $\frac{1}{\text{Log } \frac{1}{a}} \left(\frac{1}{a}\right)^h$ est négligeable) et le

tâtonnement peut être évité par le tracé d'une hyperbole équilatère sur laquelle on portera l'indication du flux en lumens.

On peut enfin tracer un abaque absolument général, mais il faut bien faire attention que l'origine de chacune des courbes $\left(\frac{1}{a}\right)^x$ est différente. En réalité cet abaque général est moins utile qu'il ne le paraît au premier abord, car l'on se contentera le plus souvent d'utiliser dans les calculs un petit nombre de valeurs de la transparence, en particulier 0,5, valeur au-dessus de laquelle a reste, sur le littoral français, pendant 0,95 du temps. Plusieurs remarques importantes ressortent de ces formules :

Pour une même portée le flux nécessaire est sensiblement proportionnel à la hauteur du plafond (voir p. 23).

Dans le cas purement théorique où la transparence aurait la valeur 1, le flux serait partagé en deux parties presque égales, proportionnelles à x et $x-h$.

Il ne faut pas augmenter la hauteur de plafond sans motif ; d'autant plus que pour toutes les valeurs de la transparence supérieures à celle qui aura servi de base aux calculs d'établissement, le plafond sera de forme concave et plus haut qu'il n'aura été prévu.

Il suffit d'une petite portion du flux pour éclairer les régions voisines du zénith et l'on augmente ainsi à peu de frais le temps pendant lequel l'aviateur peut voir le phare.

Ces raisonnements supposent que la surface qui limite la région où le phare doit être perçu est une zone sphérique et un plan horizontal. L'atmosphère est toujours plus opaque au voisinage du sol et, le plus souvent, la zone sphérique déformée au voisinage du plan focal deviendra la surface cylindrique, qui serait préférable.

Lorsque cela sera possible, il y aura intérêt à placer l'aérophare sur une hauteur et le bas du faisceau devra être légèrement plongeant. Au voisinage du plan focal, les flux sont sensiblement proportionnels aux angles dans le plan vertical et il sera facile d'évaluer le flux nécessaire pour la partie plongeante du faisceau en supposant que la transparence est la même que plus haut ; il sera prudent d'augmenter la valeur ainsi calculée, car le bas du faisceau racle le sol sur de longs parcours, très mauvaise condition pour aller loin jusqu'aux régions où il sera utilisé. Par suite de la rotondité de la terre, lorsque les phares ont de grandes portées, l'aviateur rencontre d'abord le bas du faisceau, quelle que soit la hauteur à laquelle il vole. Cette règle n'est pas en défaut lorsque le faisceau rencontre le sol, celui-ci déterminant alors la limite inférieure réelle.

Portée maximum d'un feu à éclats utilisant un flux donné.

L'étude d'un feu à éclats se ramène à celle d'un feu d'horizon de même portée déterminé à l'aide de la loi Blondel-Rey (voir p. 9) :

$$I_0 = I. \frac{t}{a + t},$$

relation dans laquelle :

I est l'intensité du feu à éclats ;

I_0 , l'intensité photométrique d'un feu fixé par l'œil de l'observateur depuis un temps infini et qui aurait même portée que le feu à éclats ;

t , le temps pendant lequel l'œil de l'observateur reçoit la lumière du feu à éclats, que l'on peut supposer égal à la durée d'un éclat ;

a , la constante 0.21.

Au voisinage du zénith, il sera souvent impossible que la durée de l'éclat soit la même qu'au voisinage du plan focal, mais, dans toute la région où doit être concentrée la plus grande partie du flux, cette condition pourra être observée et l'on peut, sans erreur sensible, admettre qu'elle le sera partout. Le feu à éclats

a la même portée qu'un feu fixe ayant un flux égal au flux utilisé par le feu à éclats multiplié par le facteur $\frac{t}{a+t}$ et par le rapport entre l'angle trièdre découpant dans le flux émis par la source le flux reçu par l'optique et l'angle trièdre dans lequel il est condensé.

Comparaison des éclats longs et des éclats brefs.

Quelle durée faut-il donner à l'éclat pour avoir le meilleur résultat ? Est-on plus avancé que Fresnel ne l'était en 1820 lorsqu'il écrivait (voir p. 7) : « Malheureusement il est difficile de décider jusqu'à quel point on doit sacrifier l'intensité à la durée ou la durée à l'intensité ? »

Fresnel avait donné aux éclats des appareils qu'il avait étudiés la durée nécessaire pour que le navigateur puisse faire son relèvement sur un seul éclat ; les intervalles entre éclats avaient, par suite, une durée qui a été jugée excessive depuis longtemps.

Bourdelle, le créateur des feux-éclairs, avait admis qu'il n'était pas utile de donner aux éclats une durée supérieure à 0s,1 ; il considérait que cette durée suffisait, dans tous les cas, pour la perception intégrale de l'éclat. Après 1900, l'Administration française des Phares, sous l'impulsion de Ribière son nouveau directeur, augmenta la durée des éclats de tous les feux-éclairs et cette modification fut unanimement approuvée.

La loi de Blondel et Rey montre que 0s,1 est bien souvent insuffisant pour assurer le seuil de perception et, *à fortiori*, pour assurer la perception intégrale. Elle permet de calculer l'avantage résultant de l'accroissement de durée, peut elle indiquer la durée la plus avantageuse ?

La loi de Blondel et Rey, à l'heure actuelle universellement employée pour prévoir la portée des feux à éclats brefs en tenant compte de leur durée, montre qu'il y a toujours intérêt à diminuer la durée pour augmenter la portée et elle permet d'en chiffrer le bénéfice.

Si on considère deux feux d'intensités I_1 et I_2 et de durées t_1 et t_2 qui ont même portée, on peut écrire :

$$I_0 = \frac{I_1 \cdot t_1}{a + t_1} = \frac{I_2 \cdot t_2}{a + t_2} \quad I_1 \cdot t_1 = I_2 \cdot t_2 \cdot \frac{a + t_1}{a + t_2}.$$

$\frac{a + t_1}{a + t_2}$ varie moins vite que $\frac{t_1}{t_2}$, mais ces deux rapports sont toujours à la fois plus grands ou plus petits que 1.

Le flux nécessaire pour produire un signal visible à une distance donnée croît avec la durée du signal, mais il croît moins vite que cette durée. La première de ces deux conséquences a tout de suite été remarquée, l'importance de la deuxième n'est apparue qu'assez récemment.

Le tableau ci-dessous donne pour plusieurs valeurs de t (durée des éclats) les valeurs de I_0 pour $I \cdot t = \text{Constante}$ et les valeurs de $I \cdot t$ dans l'hypothèse que tous les feux ont même portée, c'est-à-dire même valeur de I_0 .

TABEAU.

Durée des éclats t en secondes	I. $t = \text{Constante}$ Valeurs de I_0 en fonction		I. = Constante Valeurs de $I \cdot t$ en fonction	
	de $I \cdot t$	de $\frac{I \cdot t}{2,21}$	de I_0	de $I_0 \cdot 0,21$
2	$\frac{I \cdot t}{2,21}$	1	$I_0 \cdot 2,21$	10,52
1	$\frac{I \cdot t}{1,21}$	1,83	$I_0 \cdot 1,21$	5,75
0,1	$\frac{I \cdot t}{0,31}$	7,13	$I_0 \cdot 0,31$	1,48
0,01	$\frac{I \cdot t}{0,22}$	10,05	$I_0 \cdot 0,22$	1,05
ϵ	$\frac{I}{0,21}$	10,52	$I_0 \cdot 0,21$	1

Ce tableau n'indique aucun feu d'une durée supérieure à 2 secondes, les aviateurs étant d'accord pour demander que les éclats se répètent de 2 en 2 secondes. Pour que les feux ne puissent se confondre avec les appareils d'éclairage ordinaire, il faut des feux à éclats et il paraît assez opportun de fixer la durée des éclats et celle des intervalles obscurs qui les séparent à la même valeur : 1 seconde.

Il y aurait de sérieuses difficultés à réaliser des durées très courtes et il ressort du tableau ci-dessus qu'elles ne sauraient procurer un bénéfice appréciable.

D'un autre côté, les essais du Service central des Phares et Balises du Ministère des Travaux publics ont montré que la portée des éclats d'un phare n'augmentait plus qu'avec lenteur à partir d'une durée efficace de 0s,25 correspondant à une durée maximum de 0,4 environ (1).

Pour l'observateur en avion, le temps maximum d'atteinte du seuil de perception d'une lumière est notablement moindre, il est de 0s,05 si l'on admet la relation indiquée à la page 18 entre les valeurs de λ données par Jean Rey et par l'abaque du Ministère de l'air.

On n'a jusqu'ici aucune base certaine pour fixer la durée optimum à donner aux éclats des aérophares, mais les aviateurs préfèrent les éclats de longue durée et rien ne permet d'écarter leur opinion.

(1) Ribière, *Phares et fanaux*, page 15.

Pour essayer, en laboratoire, de déterminer la durée optimum des éclats, on a construit un appareil dont les figures 19 et 20 donnent l'une le schéma, l'autre la photographie. Sur l'écran G apparaît de 2 en 2 secondes un trait brillant ; le temps pendant lequel ce trait est visible et l'éclairement peuvent varier en res-

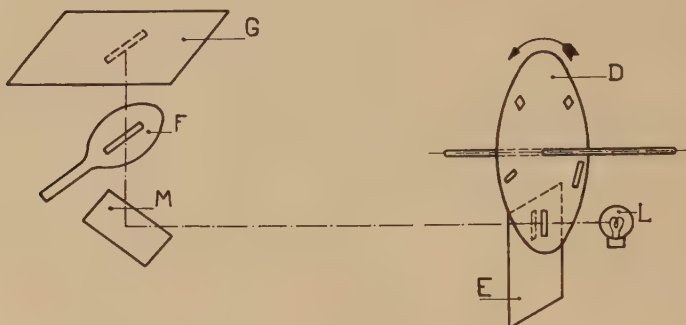


FIG. 19.

tant liés par la relation : $It = \text{constante}$. A cet effet, l'écran D est percé de 5 fenêtres dont les largeurs sont : 80, 40, 20, 10, et 5 mm et les hauteurs 2, 4, 8, 16 et 32 mm ; la largeur détermine la durée de l'éclat, la hauteur détermine son

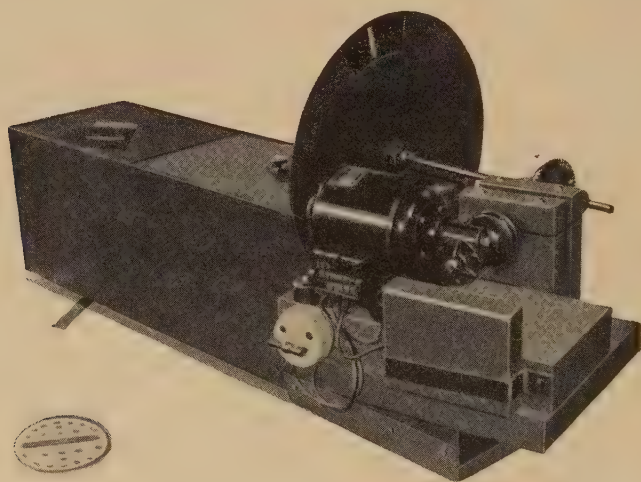


FIG. 20.

intensité ; un deuxième disque au contact du premier sert à isoler la fenêtre correspondant à l'éclat que l'on veut étudier. En outre on peut modifier d'un seul coup l'intensité de tous les feux en changeant une opaline placée au contact de la fenêtre portée par l'écran opaque E. L'orientation du trait lumineux peut

être modifiée, à la volonté de l'opérateur, en tournant l'écran à fente F, à l'aide du levier placé sous l'appareil.

Chaque essai est conduit de la même façon : l'opérateur choisit l'ouverture du disque tournant D, qui donne la durée et détermine l'intensité ; il règle l'orientation du trait brillant ; de son côté, l'observateur tient à la main un petit disque en verre (en bas et à gauche sur la photographie) portant un trait gravé de même longueur que le trait brillant, mais un peu moins large. Le disque tournant D est alors mis en mouvement à l'aide d'un moteur asynchrone alimenté par le secteur, et l'opérateur compte le nombre d'éclats nécessaire à l'observateur pour mettre les deux traits en coïncidence.

L'opérateur arrête le moteur et vérifie la position du disque ; il inscrit le nombre d'éclats qui ont été nécessaires et ajoute une note qui tient compte des écarts entre le trait lumineux et le repère : *très bien* (zéro) si le repère est bien centré ; *bien droit* (1) si le repère est sur le bord du trait lumineux ; *bien oblique* (2) si le repère est en oblique ; *assez bien* (3) si le repère déborde le trait. A la fin des essais et pour chaque ouverture du disque, on fait le total par observateur, puis le total général. On fait ensuite dans les mêmes conditions les totaux des points de pénalisation.

En dehors de nombreux essais préliminaires, il a été fait 5 séances, à chacune desquelles ont participé 6 observateurs ; 5 de ceux-ci ont pris part à toutes les séances, 2 ont pris part, l'un à 2, l'autre à 3 séances. La vitesse du disque obturateur était de 10 tours en 23 secondes, donnant des durées d'éclats de 0s,22, 0s,11, 0s,055, 0s,0275, 0s,01375. L'éclairement produit sur le verre dépoli par le trait brillant de l'éclat bref a été de 30 lux pendant 3 séances et de 0,6 lux pendant les 2 autres. La proportionnalité de l'éclairement du verre dépoli aux surfaces des ouvertures du disque a été vérifiée au photomètre.

Observateur	Dimensions de l'ouverture (millimètres)				
	80.2	40.4	20.8	10.16	5.32
Marsat	19	19	19	23	17
	2	1	2	3	2
Bassot	30	24	21	27	27
	9	3	3	7	4
Uriet	11	11	10	9	10
	4	2	2	2	
Dauvillier	11	17	15	11	9
	4	3	1	1	1
Huchard	23	20	19	19	17
	9	4	9	5	4
Févroty	20	17	16	17	19
	5	5	8	4	7
Lheureux	24	21	20	20	16
	10	2	3	6	4
Totaux	138	129	120	126	115
	43	20	28	28	22

Pour chaque opérateur, deux nombres sont inscrits l'un au-dessus de l'autre: sur la première ligne le total des éclats, sur la deuxième le total des points de pénalisation.

Les observations faites avec la lumière la plus forte ne diffèrent pas sensiblement de celles qui ont eu lieu avec la lumière la plus faible, un seul tableau suffit.

Les expériences exécutées avec le nouvel appareil montrent, comme celles de 1911 (1), que 4 ou 5 éclats sont nécessaires pour que l'observateur ait confiance dans un pointé; elles indiquent à nouveau un très léger avantage en faveur des éclats brefs; celui-ci est bien minime vis-à-vis des arguments invoqués par les partisans des éclats longs.

Les expériences de J. Rey (2), qui l'ont amené à envisager la visibilité proportionnelle, semblent montrer que la probabilité de perception d'un éclat est indépendante de sa durée. Mais toutes les précautions prises pour faciliter le travail des observateurs: sonnerie pour avertir du moment où l'éclat allait se produire, éclairage discret permettant de placer l'œil en direction et de l'accommoder en distance, devaient certainement provoquer ce résultat. Il est nécessaire, malgré ce précédent, d'étudier la probabilité de perception des éclats.

Probabilité de perception des éclats.

La perception d'un éclat exige qu'un élément de la rétine ait reçu une quantité suffisante d'énergie lumineuse. Nombreux sont les facteurs qui interviennent pour modifier cette donnée, mais, au moment où l'éclat est perçu, on peut affirmer que la probabilité de perception aurait été très petite si le temps nécessaire pour atteindre le seuil avait précisément été égal à la durée de l'éclat ou au temps maximum d'attente pendant lequel l'observateur donne à son œil des mouvements assez faibles pour qu'un seul élément de la rétine reçoive toute la lumière qui a pénétré dans l'œil. La probabilité est d'autant plus élevée que le temps nécessaire pour atteindre le seuil est plus différent de la durée de l'éclat et du temps maximum d'attente. Pour un même observateur, ce temps est très variable selon les circonstances; au moment où l'éclat est perçu, sa valeur est déterminée; pour comparer les probabilités de perception de deux éclats de durées différentes, il faut admettre qu'il a même valeur dans les deux cas: l'on est conduit à envisager seulement les durées des éclats; ou mieux les différences entre ces durées d'éclat et les temps nécessaires pour atteindre le seuil. L'éclairement produit par un faisceau de phare varie avec la distance, le temps nécessaire

(1) Blondel et Rey, *Sur la perception des lumières brèves à la limite de leur portée*, page 31.

(2) Note présentée à la Réunion des Chefs de Service de l'Eclairage et du Balisage des Côtes à Londres, juillet 1929.

pour atteindre le seuil et la probabilité de perception varient donc également. La probabilité totale est la somme des produits des probabilités aux différentes distances par les temps de parcours correspondants ; il est intéressant d'étudier le temps total T pendant lequel le phare envoie sa lumière vers l'aviateur qui vole, à vitesse constante, depuis la limite de portée jusqu'au phare ; intéressant également d'étudier la portion de ce temps qui joue réellement dans la détermination de la probabilité de perception.

Le temps T est le produit de la durée d'un éclat par le nombre n d'éclats émis par minute et par le temps de parcours, quotient de la portée en kilomètres P par la vitesse de l'avion V en kilomètres par minute ; on peut écrire :

$$T = t \cdot n \cdot \frac{P}{V} .$$

Pour comparer deux appareils, il faut admettre que la vitesse de l'avion V et le nombre n d'éclats par minute sont les mêmes.

Il suffit de considérer les produits : $t \cdot P$.

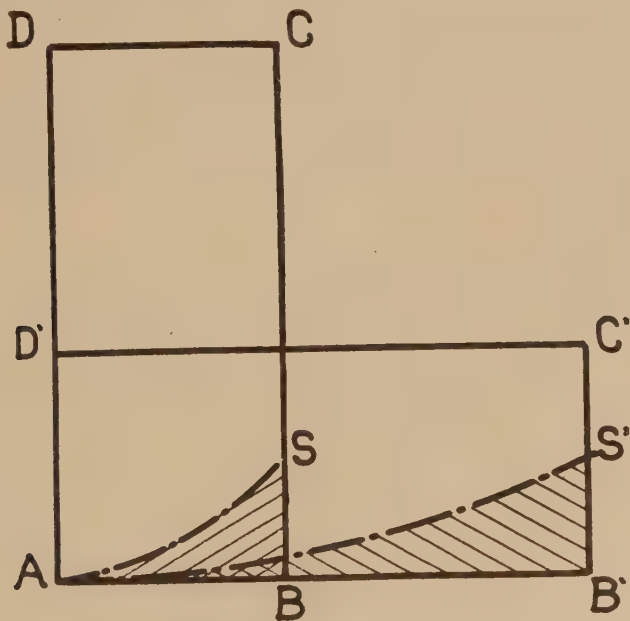


FIG. 21.

La figure 21 représente deux rectangles $ABCD$ et $A'B'C'D'$ dont les bases sont proportionnelles aux portées de deux feux utilisant des flux égaux dans des éclats de durées différentes et les hauteurs proportionnelles aux durées des éclats. Les surfaces des rectangles sont donc proportionnelles aux produits $t \cdot P$ et $t' \cdot P'$, qu'il faut comparer.

On a vu (p. 26, al. 6) que, pour $a=1$, le flux lumineux se partagerait en deux parties presque égales et proportionnelles à la portée x et à $x-h$; on aurait $x = \frac{\varphi-\lambda}{2}$. Les portées croissent un peu moins vite que les flux. Il en résulte que par suite de la règle indiquée à la page 28 pour l'étude des feux à éclats, on ne pourra jamais avoir $t.P = t'.P'$, que l'on aura toujours $t.P > t'.P'$.

Mais la perception d'un feu n'est pas instantanée, elle prend un temps appréciable; on peut tracer à la partie inférieure des rectangles les courbes AS et AS' (1), qui sont les courbes des temps d'obtention du seuil de perception pour les deux feux. Ceux-ci donnant, à la limite de portée, une même valeur d'éclairement λ , les deux courbes sont identiques à l'échelle près, qui est le rapport entre les bases des rectangles. Les aires situées au-dessus des courbes sont proportionnelles aux sommes des produits des durées corrigées des éclats par les portées correspondant à chaque feu.

C'est le rectangle le plus petit qui a subi la plus forte amputation.

Le temps d'obtention du seuil, la transparence a toujours inférieure à l'unité, ont pour effet de diminuer plus vite la portée du feu le plus bref et, par suite, le produit $t'.P'$ qui le concerne.

Si les points S et S' sont tous deux en dessous de D' C', ils sont à la même hauteur. Si le point S est au-dessus de D' C', l'éclat le plus bref a une portée plus faible qu'un éclat de plus grande durée pour lequel S' et C' seraient confondus. Le produit $t'.P'$, inférieur à tP pour cet éclat, l'est *a fortiori* pour l'éclat réel.

Voici un exemple :

Deux appareils ont été établis pour utiliser des flux égaux : 4π . 100 000 lumens; leurs portées ont été déterminées pour la même valeur de $\lambda = 1$ correspondant à un temps de perception de 0,05 seconde, une hauteur de plafond de 1 kilomètre et une transparence de 0,5 par kilomètre, qui, en moyenne, est dépassée pendant 95 % du temps sur toute l'étendue du territoire français.

L'éclat produit par l'un d'eux dure 1 seconde, l'éclat de l'autre dure 0,1 seconde. La figure 22 reproduit l'épure qui a servi à déterminer les portées 12 km, 750 et 15 km, 800 et la figure 23 représente les deux rectangles proportionnels aux produits des durées des éclats par les portées; les notations sont les mêmes que sur la figure 21.

Le rapport entre les surfaces ASCD et AS'C'D' est 9,3. Pour un aviateur se diri-

(1) Les courbes AS et AS' sont faciles à tracer, le temps nécessaire pour obtenir le seuil d'excitation est :

$t = \frac{0,21 E}{E - E_0}$ (Blondel et Rey. Sur la perception des lumières brèves) ou, en posant $E = n E_0$, $t = \frac{0,21}{n-1}$.

geant à vitesse constante vers le phare, le produit $t \cdot P$ est donc 9,3 fois plus fort lorsque les éclats ont une durée de 1 seconde.

Mais la route suivie par l'aviateur ne passera pas toujours par la verticale du

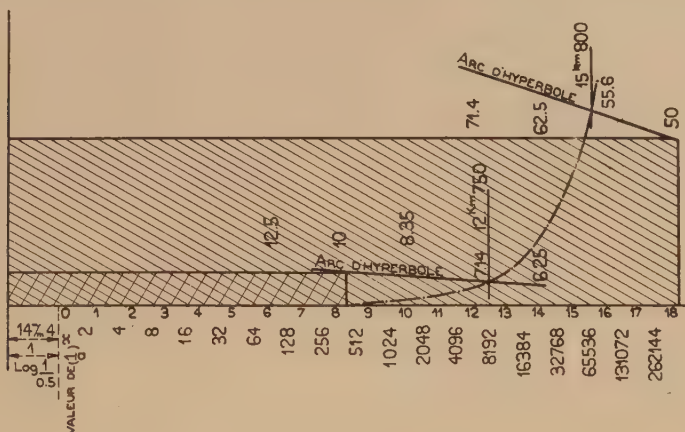


FIG. 22.

phare. Un calcul facile permet de voir que les produits des durées t et t' des éclats par les longueurs L et L' des chemins parcourus par l'avion à l'intérieur des cercles ayant pour rayons les portées P et P' seront égaux lorsque les routes pas-

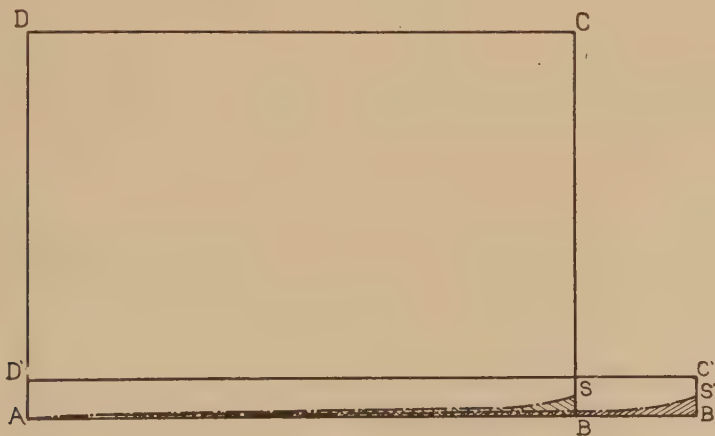


FIG. 23.

seront à une distance des appareils égale à 0,997 de la portée du phare à éclats de 1 seconde ; 0,8 de la portée du phare à éclats de 0,1 seconde. Celui-ci, quand les routes passeront à une distance supérieure, donnera un produit $t' \cdot L'$, plus grand que celui donné par l'autre appareil, et ne tardera pas à devenir seul visible.

La figure 24 représente deux cercles concentriques de rayons proportionnels aux portées ; les lignes équidistantes A'ABB', C'CDD',... figurent des routes parallèles passant à des distances $a, 2a, 3a, \dots$ du centre commun O. Ces droites peuvent servir de bases à des rectangles dont chacun représente l'un des produits t, L, t', L' , à condition d'exprimer que a représente la durée de l'éclat. La somme des produits t, L est donc pour les éclats brefs : $(AB. a + CD. a + \dots) \frac{t}{a}$ et pour les éclats longs : $(A'B'. a + C'D'. a \dots) \frac{t'}{a}$.

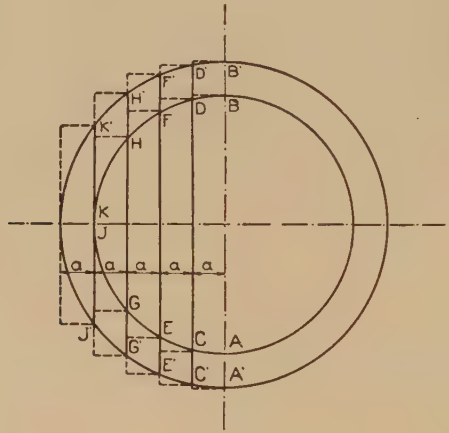


FIG. 24.

Envisageant des routes de plus en plus rapprochées, il vient à la limite, en appelant S et S' les surfaces des deux cercles :

$$S. \frac{t}{a} \quad \text{et} \quad S'. \frac{t'}{a},$$

deux valeurs infiniment grandes dont le rapport $\frac{S.t}{S'.t'}$ a au contraire une valeur bien finie, qui montre l'avantage de l'appareil à éclats longs.

Si au lieu d'aller jusqu'à la limite, on considérât un nombre fini de routes, il en résulterait un avantage supplémentaire pour le même appareil. La somme des produits $L. t$ et $L'. t'$ serait égale si les portées étaient dans le rapport $\sqrt{10} = 3,16$, alors que le rapport $\frac{15,8}{12,75}$ est 1,24 dans l'exemple choisi.

Ce raisonnement admet que toutes les routes sont dans un même plan passant par le centre des appareils. Faisant abstraction du plafond de vol qui découpe une zone dans chaque demi-sphère ayant la portée comme rayon, on peut envisager ces demi-sphères elles-mêmes ; dans ce cas les portées devraient être dans le même rapport que les racines cubiques des durées des éclats. $\sqrt[3]{10} = 2,15$ est

encore bien loin de la valeur réelle 1,24. Si la transparence voisine de 1 était supérieure à 0,98, dans le cas actuel les éclats brefs l'emporteraient nettement.

Lorsque deux phares du même modèle sont assez éloignés pour que les cercles de portées ne se coupent pas, l'avantage reste aux éclats longs. La comparaison porte alors sur les valeurs trouvées précédemment, divisées par la distance entre les appareils, ce qui ne modifie pas leur rapport.

Ces divers calculs sont basés sur les durées totales des éclats et il serait plus exact de tenir compte des durées réduites (1) ; il est facile pour une route donnée de tracer les diagrammes de celles-ci ; il serait fort long d'étudier un nombre suffisant de routes possibles pour avoir une idée exacte de leur ensemble ; au contraire, on obtient tout de suite une valeur sûrement inférieure à la valeur réelle en tenant compte de la durée réduite la plus faible de l'éclat long et de la durée totale de l'éclat bref.

Dans l'exemple cité, la durée réduite à la limite de portée est pour l'éclat long 0,95 seconde, la durée totale de l'éclat bref est 0,1 seconde : $\sqrt{9,5} = 3,082$ et $\sqrt[3]{9,5} = 2,121$; l'une et l'autre valeurs sont bien loin du rapport réel 1,24.

La portée d'un phare, la probabilité de perception des éclats, la valeur de t . P ne peuvent être considérées isolément ; une perte sur la portée doit pouvoir être compensée par un gain en probabilité.

L'abaque (fig. 25) donne facilement le coefficient de transparence qui permet d'obtenir une portée n fois plus grande en utilisant dans un phare dont on connaît la portée une source d'intensité m fois plus forte.

La droite passant par les valeurs de m et n , lues sur les échelles situées à gauche, détermine sur la ligne AB un segment AC qui a pour valeur $\log m - 2 \log n$; par le point C, on mène une ligne horizontale. L'intersection D de la ligne oblique correspondant à la portée x et de la ligne horizontale correspondant à n (lu sur la droite AB) détermine sur cette ligne horizontale un segment qui a pour valeur le produit $x(n - 1)$; la ligne verticale passant par ce point D coupe en E la ligne horizontale menée par le point C. L'inclinaison de la ligne AE est proportionnelle au coefficient de transparence a .

Si l'on calcule, à l'aide de cet abaque, le gain de portée obtenu en concentrant le flux lumineux dans un éclat plus bref, une constatation s'impose : en admettant qu'il n'y a pas à tenir compte de la loi Blondel-Rey, ni pour déterminer le temps d'obtention du seuil d'impression, ni pour calculer la portée, il faudrait une transparence atmosphérique élevée ou une portée très petite pour profiter des avantages qui paraissent résulter, pour les éclats brefs, des relations trouvées entre la portée et la durée des éclats.

Il est rare que l'on cherche la probabilité la plus grande, on se contente sou-

1. Voir page 34. La durée réduite est la durée totale de l'éclat diminuée du temps d'obtention du seuil ; elle varie avec la distance de l'observateur au phare.

vent d'une probabilité moins grande, jugée cependant suffisante ; cette remarque ramène l'attention sur la valeur même de la probabilité. En ramenant à 2 ou 3 secondes l'intervalle entre éclats fixé à 5 secondes par Bourdelle, on a augmenté la probabilité qui, du fait seul des vitesses différentes des bateaux et des avions,

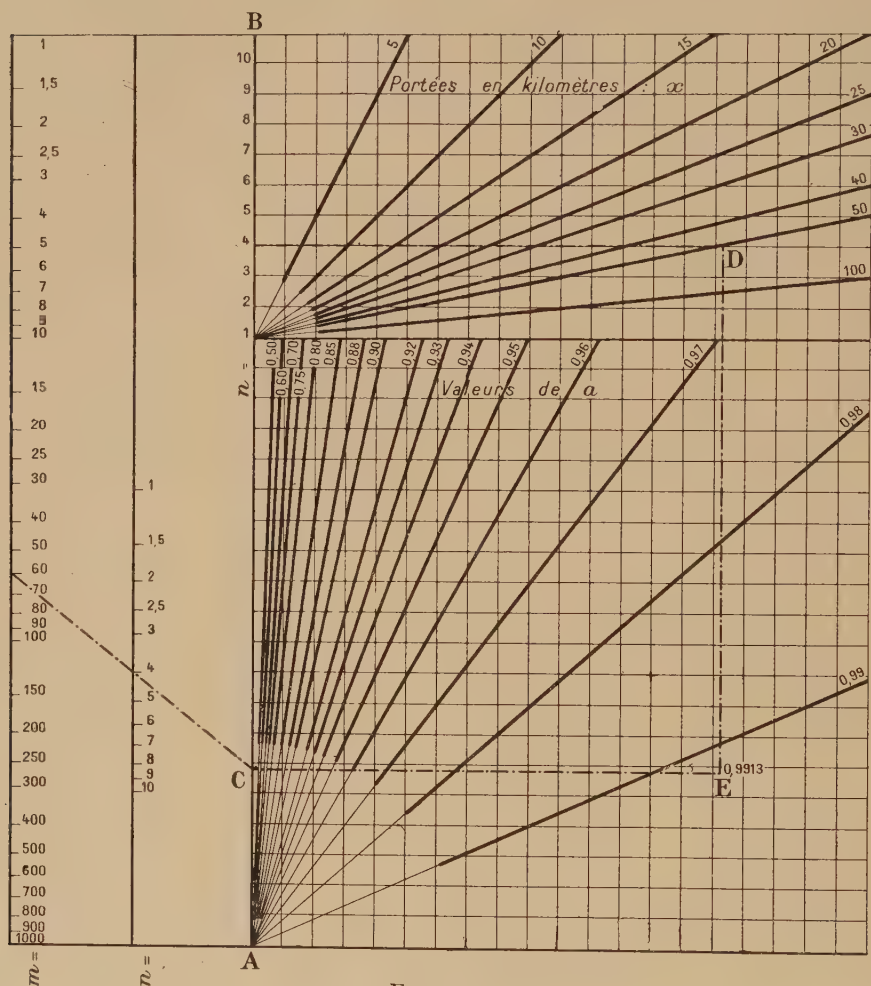


FIG. 25.

était devenue environ 10 fois plus faible. Par temps brumeux, cette probabilité risque fort d'être insuffisante ; on peut encore l'augmenter un peu en diminuant l'intervalle entre éclats. Mais le temps d'obtention du seuil n'est pas négligeable, la probabilité de perception de n éclats isolés n'est pas à beaucoup près aussi grande que la probabilité de perception d'un éclat n fois plus long, utilisant le même flux : on est amené à préférer l'éclat de longue durée.

Un aérophare émettant des éclats de durée 1 seconde séparés par des intervalles obscurs de même durée semble la solution qui concilie heureusement les nécessités d'une probabilité de perception élevée et le désir des aviateurs de ne pouvoir confondre les phares avec les lumières des éclairages urbains ni avec les enseignes lumineuses qui mettent en jeu des énergies souvent égales et même parfois supérieures.

Résultats obtenus avec les appareils actuels.

Un exemple montrera les résultats différents obtenus, à flux égal, par l'emploi d'un aérophare émettant des faisceaux coniques et par l'emploi d'un aérophare donnant la répartition méthodique du flux qui a été étudiée au cours de ce travail.

La nature de l'optique, lentilles ou réflecteurs, n'a pas grande influence sur la

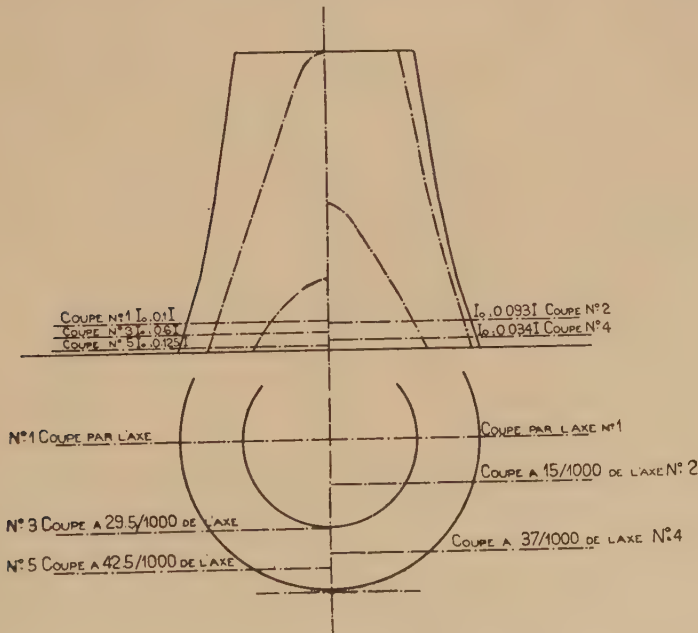


FIG. 26.

forme du faisceau d'un phare ; tout ce qui va être dit d'un appareil à réflecteurs s'applique avec de très légères modifications aux appareils lenticulaires.

La caractéristique du faisceau, supposée la même dans tous les plans passant par l'axe focal, est toujours une courbe en forme de chapeau, dont la base est environ 2 fois plus longue que la partie supérieure correspondant aux plus fortes

intensités. La figure 26 représente, en traits pleins, la caractéristique de l'éclat d'un phare dont l'optique est un miroir de 1 m, 20 ayant une distance frontale de 0 m, 375 ; il est illuminé par une lampe à incandescence de 3 kilowatts dont le corps éclairant peut assez bien être assimilé à une sphère de 36 mm de diamètre. On a tracé en traits pointillés les demi-caractéristiques pour des observateurs situés à diverses distances de l'axe du faisceau et pour chacune d'entre elles, à l'aide de la loi de Blondel et Rey, on a calculé la valeur de I_0 , en tenant compte d'une vitesse de 1 tour en 2 secondes. Pour chacune de ces valeurs de I_0 on a déterminé la portée correspondant à une transparence $\alpha = 0,5$ par kilomètre.

La figure 27 montre en coupe la région en dedans de laquelle l'aviateur peut percevoir le feu ; pour plus de clarté, l'échelle en hauteur est 10 fois

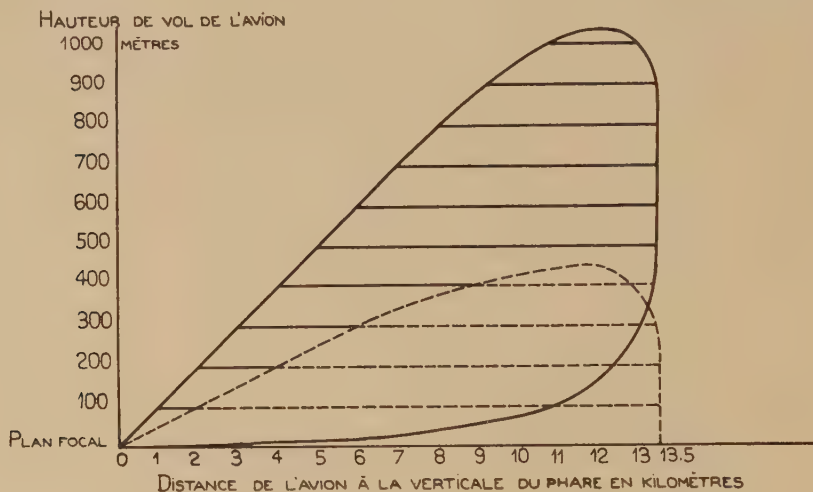


FIG. 27.

plus grande que l'échelle en largeur. On a tracé, pour des hauteurs comprises entre 100 et 1 000 mètres, des droites qui représentent pour chacune de ces hauteurs le parcours de l'avion et l'on voit tout de suite combien les longueurs de ces parcours diffèrent selon la hauteur de vol. Deux tracés, l'un en traits pleins, l'autre en pointillé, correspondent l'un au cas où le faisceau est légèrement relevé pour ne pas plonger en dessous du plan focal, l'autre au cas où l'axe du faisceau est horizontal.

Sur la figure 28, les traits pointillés montrent les courbes obtenues en portant à partir de la verticale du phare les parcours de l'avion à diverses hauteurs qui sont à leur place sur la figure 27 ; les traits pleins montrent les courbes obtenues en multipliant ces parcours par la durée des éclats, la durée de l'éclat dans le plan diamétral du faisceau étant prise pour unité. L'écart entre les traits pleins

et pointillés A et A', B et B' montre l'effet de la durée variable de l'éclat selon la hauteur de l'observateur dans le faisceau.

On obtiendrait une portée maximum un peu plus faible en plaçant la même lampe de 3 kilowatts dans un phare qui donnerait, avec la répartition optimum des intensités, des éclats de 1 seconde séparés par des intervalles obscurs de même durée, mais cette portée serait la même à toutes hauteurs et le produit de cette portée par la durée de l'éclat serait 31 fois plus grand que la valeur maximum obtenue avec le phare à éclats brefs. Pour représenter ce produit, on a tracé sur

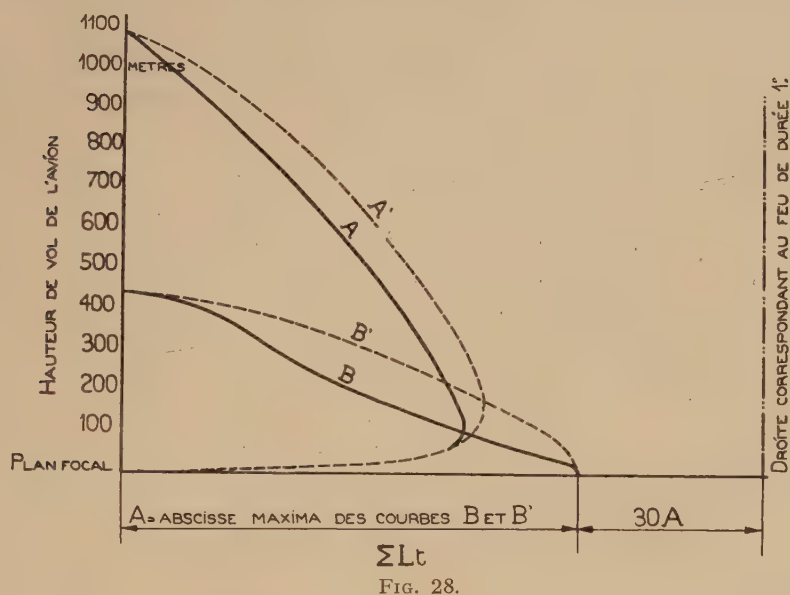


FIG. 28.

la droite de la figure une ligne en pointillé qui devrait, en réalité, être très loin en dehors.

Un appareil à miroirs segmentés aurait toujours des portées plus petites que l'appareil à miroir entier, mais par contre les produits des parcours par les durées d'éclat seraient toujours plus grands et d'autant plus que la segmentation serait plus poussée.

Les appareils les plus récents ont tous plus ou moins abandonné les faisceaux coniques des premiers aérophares. Beaucoup d'ingénieurs ont vu qu'il fallait créer du nouveau, mais aucun n'a approché la solution préconisée ici, ils ont commis l'erreur de baser la répartition du flux sur l'hypothèse tout à fait irréalisable d'une transparence absolue, ou juxtaposé plusieurs faisceaux, qui ne peuvent donner qu'une amélioration insuffisante. Une connaissance plus complète des propriétés de l'atmosphère brumeuse pourrait certainement amener un nouveau progrès.

Résumé et conclusions.

La loi de Blondel et Rey, débordant le cadre des expériences qui ont permis de la formuler, est la loi physiologique qui relie l'intensité de l'éclairement produit sur l'œil par une source de petites dimensions apparentes et le temps d'action nécessaire pour atteindre le seuil de perception. Elle joue un rôle des plus importants dans les études relatives aux aérophares.

La loi d'Allard relie la valeur de l'éclairement de l'œil aux trois facteurs principaux qui le déterminent : l'intensité de la source, la transparence de l'air et la distance. Elle ne tient pas compte d'autres facteurs dont les expériences montrent qu'ils ne sont point négligeables. Cette étude est cependant basée sur cette loi qui, à son caractère général, joint l'avantage de se prêter à des calculs faciles.

L'éclairement minimum perceptible varie beaucoup selon les auteurs qui ont entrepris de le mesurer. La loi de Blondel et Rey montre l'influence du temps d'obtention du seuil : aucune valeur de l'éclairement minimum ne devrait être donnée sans une indication des conditions d'observation. La loi de Blondel et Rey semble mettre d'accord les valeurs indiquées pour les phares par Allard, par Jean Rey et par les Services du Ministère de l'Air. Un choix judicieux de la valeur de λ permet d'éviter de calculer I_0 pour chacun des éclats que l'on veut comparer.

En partant de ces données, on a établi plusieurs abaques pour le calcul des portées et une méthode graphique qui permet de déterminer, en fonction de la hauteur du plafond de vol et de la transparence, la portée maximum d'un feu d'horizon utilisant un flux donné. On connaît ainsi la répartition du flux nécessaire pour réaliser cette portée.

La loi de Blondel et Rey permet de substituer à l'étude d'un feu à éclats, l'étude d'un feu d'horizon ayant même portée.

Fresnel, Bourdelle, Ribière ont successivement préconisé des durées d'éclats très différentes ; en réalité on n'est pas encore bien fixé sur la durée d'éclats qui donnera le plus heureux résultat. Des expériences de laboratoire ont à deux reprises donné le même renseignement peu précis. L'étude simplifiée de la probabilité semble donner des avantages aux éclats brefs, ceux-ci ne s'obtiennent que par des transparences élevées, bien exceptionnelles.

En pratique, on ne recherche pas toujours la probabilité la plus élevée, on se contente d'une probabilité moindre, que l'on estime suffisante. Du fait seul de la très grande vitesse des avions, la probabilité de perception d'un feu est environ 10 fois plus faible pour l'aviateur que pour le marin. On a déjà rapproché les éclats ; il est à craindre qu'elle ne soit encore trop faible par temps brumeux. Le procédé le plus certain de l'augmenter est d'utiliser des éclats longs. On doit envisager des éclats de 1 seconde séparés par des intervalles obscurs de même

durée. Au Comité national français de l'Eclairage, lors des réunions préparatoires au Congrès tenu à Berlin en mai 1930, des aviateurs d'Air-France indiquaient déjà cette solution.

Enfin il ne faut donner à un aérophare ni une intensité photométrique particulièrement grande en un faisceau trop étroit, ni des portées considérables par très beau temps dans un champ restreint, il faut lui donner une répartition du flux et une durée d'éclats telles que, pour tous les aviateurs, quelle que soit leur hauteur de vol, en dessous d'un plafond judicieusement choisi et même par transparence médiocre, la probabilité de le reconnaître en temps utile soit aussi élevée que possible ; on pourrait choisir comme base de calcul la valeur au-dessous de laquelle la transparence descend rarement (pendant un dixième ou un vingtième du temps) et rend le vol peu recommandable.

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté :

ÉTUDE HISTORIQUE ET CRITIQUE SUR LES SOURCES LUMINEUSES ET LES SYSTÈMES OPTIQUES POUR PHARES

SOMMAIRE. — *Un foyer, pas d'optique. Un foyer et une optique rudimentaire. Une lampe à huile et un réflecteur.*

Les sources de lumière. La lampe à double courant d'air. La lampe à mèches concentriques. Les brûleurs à manchons. L'arc électrique. L'incandescence électrique.

Les optiques. Le Phare de Cordouan. Naissance des feux à éclats. Fresnel. Les réflecteurs paraboliques. Les lentilles à échelons. Leur comparaison avec les réflecteurs. Les anneaux catadioptriques. L'appareil du Canal Saint-Martin. Les divers Feux. Les Feux scintillants. Les Feux-Eclairs. Les perfectionnement des optiques. Les méthodes de contrôle. Le rendement des anneaux catadioptriques. Les nouveaux phares à réflecteurs.

Les dimensions de l'optique et l'éclat des sources.

Un foyer, pas d'optique. — Depuis leur origine jusqu'au 18^e siècle, les phares maritimes n'eurent comme moyen d'éclairage qu'un foyer allumé en plein air, aussi visible la journée par sa fumée que la nuit par sa lumière. Pendant toute cette période, aucun progrès important ne semble avoir été réalisé ; au tas de bois allumé à même le sol on avait bien substitué en certains cas des tas de houille ; on avait créé des grilles pour permettre une meilleure combustion et construit des cheminées pour augmenter le tirage, mais aucune de ces modifications n'avait eu une supériorité assez nette pour faire abandonner les dispositifs antérieurs.

Un foyer et une optique rudimentaire. — En 1727, M. de Bitry faisait installer sur la Tour de Cordouan une lanterne en fer qui comportait une grille pour 225 livres de charbon de terre et un réflecteur de forme conique ; par contre il n'y avait plus de cheminée. Cet appareil comportait donc une optique rudimentaire, il semble bien avoir été le premier à recevoir cette addition, qui devait par la suite devenir beaucoup plus importante que la source de lumière par ses dimensions comme par son prix.

Une lampe à huile et un réflecteur. — En 1781 au Phare de la Hève, en 1782 au Phare de Cordouan, apparaissent des appareils constitués par plusieurs réverbères comprenant chacun une lampe à huile et un réflecteur sphérique ; ces appareils fournis par M. Sangrain, concessionnaire de l'éclairage public à Paris, étaient fort analogues aux appareils qui servaient à éclairer les rues : les réflecteurs sphériques peu précis étaient argentés à la feuille, les lampes à huile étaient peu différentes de celles qui étaient utilisées par les anciens, elles avaient de une à trois mèches de 48 millimètres de largeur et fumaient beaucoup.

A partir de ce moment, les progrès deviennent fort rapides et il est plus commode d'étudier isolément les améliorations réalisées dans les sources de lumière, et les modifications des optiques qui permirent de tirer un meilleur parti de la lumière produite.

Les sources de lumière.

Les sources lumineuses utilisées dans les phares ont suivi de très près les progrès réalisés pour les autres modes d'éclairage, mais à chaque époque elles ont différé des modèles usuels par leurs dimensions notablement plus grandes.

La lampe à double courant d'air. La lampe à mèches concentriques. Les brûleurs à manchons. — Dès 1783, Teulère propose de substituer aux lampes à mèches plates les lampes à double courant d'air utilisant des mèches circulaires, mais ne comportant pas de cheminées en verre ; l'appareil installé en 1792 au Phare de Cordouan comprend des brûleurs à double courant d'air et à cheminées de verre, connus sous le nom de lampes d'Argand. Pour augmenter la puissance des phares, Bordier-Marcet, reprenant une idée de Sangrain, préconise l'emploi, dans un seul réflecteur, de deux lampes munies chacune de leur cheminée en verre.

Vers 1800, Carcel substitue aux lampes munies de réservoirs à niveau constant des lampes dotées d'un mouvement d'horlogerie destiné à actionner la pompe qui alimente la mèche ; l'huile est surabondante et l'excès fait retour au réservoir, on évite ainsi l'échauffement du bec, on retarde l'altération de la mèche qui produit l'affaiblissement progressif de la lumière. Les lampes à niveau constant ne disparaissent pas pour cela et on les retrouve encore dans beaucoup d'appareils, légèrement modifiées pour l'emploi du pétrole ; la lampe à mouvement mécanique est toujours préférée pour les gros brûleurs. Vers 1820 Arago, seul, puis en collaboration avec Fresnel, crée les lampes à mèches multiples concentriques ; ils établissent un modèle à quatre mèches ; par la suite on augmente encore ce nombre, mais en France on ne dépasse pas en service courant six mèches ; on établit cependant un modèle à dix mèches.

Au début toutes ces lampes sont alimentées à l'huile de colza, puis au pétrole. Parallèlement, surtout en Angleterre, on utilise de gros brûleurs à gaz.

Peu avant 1900, l'on substitue aux lampes à mèches des lampes à vapeur de pétrole munies de gros manchons à incandescence dérivant des manchons Auer.

L'arc électrique. L'incandescence électrique. — En 1863, l'arc électrique fait son apparition au Phare de la Hève et l'on peut croire qu'il va chasser la lampe à huile de tous les phares importants. En 1881, le Service des Phares de France établit un projet approuvé par une loi de 1882 : 46 phares doivent être transformés et munis de l'éclairage électrique. Cette modification est arrêtée en cours de route, les phares électriques ne donnant pas les résultats espérés, à tort il est vrai, comme on le sait maintenant. Il n'y a jamais eu en France plus de 13 phares à arc électrique et presque partout on le remplace par l'incandescence.

Enfin, dans ces dernières années, on a de plus en plus souvent recours à l'éclairage électrique à incandescence ; les lampes destinées à ce service sont caractérisées par la disposition donnée au filament et par leur puissance : les lampes de 3 kilowatts sont très répandues, celles de 10 kilowatts ne sont pas rares et il a même été fait des lampes de 40 kilowatts ; les autres applications de l'éclairage ne comportent guère de lampes de plus de 1 kilowatt.

Tous les modes d'éclairage sont essayés, mais, en dehors des gaz comprimés pour les bouées et les petits feux, aucun d'eux n'a un développement appréciable.

Les Services des Phares ont adopté successivement ces divers modes d'éclairage, qui permettraient d'obtenir avec un même appareil des intensités lumineuses de plus en plus grandes et par suite des portées de plus en plus considérables. Mais la nécessité d'avoir une divergence verticale suffisante, le désir de ne pas avoir des durées d'éclat trop brèves ont nécessité l'établissement de modèles très volumineux ou provoqué l'abandon des optiques de très grande taille ; pour les lampes à mèches multiples, tout comme pour les grosses lampes à incandescence, les gros modèles eurent l'avantage d'avoir une brillance plus élevée que les modèles courants.

L'augmentation de l'intensité lumineuse fut notable à chacun de ces changements : la brillance de la partie la plus éclairante de la flamme des brûleurs à pétrole était comprise entre 3 bougies,5 par centimètre carré pour le bec à une mèche et 11 bougies pour le bec à cinq mèches ; la brillance des manchons à incandescence par le pétrole était de 30 bougies, celle des lampes à incandescence dépasse parfois 1 000 bougies, valeur qui n'est pas la brillance réelle du filament de tungstène, mais la brillance que présenterait un corps éclairant homogène ayant même encombrement que le filament lui-même ; celui-ci est d'abord roulé en spirale, puis replié plusieurs fois de façon à constituer les arêtes d'un prisme ; dans les lampes les mieux adaptées au service des phares, les bases de ces prismes sont des polygones réguliers.

On attache la plus grande importance à la portée des phares ; pour obtenir régulièrement la portée maximum d'un appareil, il est utile que le corps éclairant

garde toujours la même forme, que la brillance soit la même en tous points et en toutes directions ; les lampes à flammes ne répondent que très imparfaitement à ces conditions, les manchons à incandescence s'en rapprochent beaucoup, les filaments des lampes à incandescence ont des formes assez stables, mais la brillance moyenne est très variable suivant la direction d'observation. Les ingénieurs des phares cherchent à utiliser au mieux les sources lumineuses dont ils disposent dans ce but, ils étudient soigneusement la répartition de la brillance et placent les foyers des optiques aux points les plus brillants : ils évitent ainsi une erreur assez fréquente, qui consiste à placer au foyer géométrique du système optique d'un appareil d'éclairage un point de la source qui n'est déterminé que par la forme de celle-ci.

Les Optiques.

Le Phare de Cordouan. — L'appareil Sangrain installé en 1782 au Phare de Cordouan comportait des réflecteurs sphériques ; ceux-ci ne peuvent, comme des réflecteurs paraboliques, donner la concentration maximum du flux lumineux émis par une source de petites dimensions, mais lorsque la source est volumineuse, peu homogène et de position incertaine, on peut les préférer, à cause de leur exécution plus facile. Le nouvel appareil provoqua tout de suite les plaintes des navigateurs et, dès l'année suivante, Teulère, ingénieur en chef de la Généralité de Bordeaux, fut chargé de l'améliorer : dans son rapport il concluait à l'infériorité du miroir sphérique et préconisait l'emploi d'une lampe à mèche ronde de 50 mm de diamètre environ, avec courant d'air au centre de la flamme mais sans cheminée ; il préconisait des réflecteurs paraboliques utilisant une plus grande partie du flux lumineux, qui auraient eu 5 pouces $1/2$ de distance focale et 21 pouces de diamètre, soit environ 4 fois cette distance focale. Ces appareils ne furent pas construits et en 1792 seulement on installa un nouvel appareil construit en collaboration avec Borda : cet appareil comportait des lampes d'Argand à double courant d'air et cheminées de verre, placées devant des réflecteurs paraboliques ayant une distance focale voisine du sixième du diamètre. L'appareil était mis en rotation par un mouvement d'horloge.

Naissance des feux à éclats. — Teulère, dans un rapport de 1783, avait proposé de faire tourner l'appareil de Cordouan, non pour obtenir un feu à éclats, mais pour répartir la lumière plus uniformément autour de l'horizon ; en 1784 Lemoyne, maire de Dieppe, avait, dans un mémoire à l'Académie des Sciences, préconisé l'occultation périodique d'un feu fixe à l'aide d'écrans tournants, pour caractériser un appareil ; il signalait qu'en Suède le Phare de Marstrand comportait quatre réverbères fixés sur un arbre vertical qui tournait : cet appareil produisait ainsi quatre faisceaux séparés et donnait quatre éclats. L'appareil installé en 1792 à Cordouan était un feu à éclats : les douze réflecteurs étant répartis par quatre sur chacune des faces d'un prisme triangulaire.

Fresnel. Les réflecteurs paraboliques.— Lorsque, en 1819, Fresnel fut adjoint à la Commission des Phares, il chercha le degré de profondeur le plus avantageux à donner à un réflecteur parabolique dont on a fixé soit la surface, soit le diamètre ; dans le premier cas l'angle d'ouverture du miroir devait être de $107^{\circ}59'4''$, dans le second cas il devait être de $126^{\circ}24'52''$, la première solution n'occasionnait qu'une perte de $1/22$ dans l'effet de la réflexion utile, en produisant une économie de $1/5$ sur la surface du réflecteur.

Voici la définition que Fresnel donnait de l'effet utile :

« Le bon emploi d'un cône lumineux infiniment mince qui tombe sur la surface du miroir est proportionnel à la distance r de cet élément de la surface du miroir ; à la vérité, la divergence des rayons partis des différents points de l'objet éclairant est en raison inverse du carré de cette distance, mais la perte de lumière ne doit être considérée comme proportionnelle qu'à la divergence dans un seul sens, dans le sens vertical.

« Le nombre de rayons compris dans le cône lumineux différentiel est égal à $2 \pi \sin s. ds$, qu'il faut multiplier par r pour avoir la mesure de l'effet utile produit, ce qui donne $2 \pi r. \sin s. ds$. »

Il est exact que la divergence varie en raison inverse de la distance, mais le flux reçu varie suivant la même loi et il n'en résulte aucun avantage ; au contraire le flux étant plus petit, on pourrait dire que l'effet utile de l'élément de miroir est moindre. Néanmoins l'angle de $126^{\circ}24'52''$ correspond bien à un maximum important.

On appelle caractéristique d'un phare ou d'un projecteur le tracé en coordonnées rectangulaires de la courbe des intensités en fonction des divergences angulaires, des durées des éclats ou des largeurs des champs éclairés, aspects différents du même phénomène. Cette courbe est tracée dans un plan passant par l'axe focal.

L'angle de 126° déterminé par Fresnel correspond au maximum de l'aire limitée par la caractéristique, aire qui peut être prise comme définition de l'effet utile U . Il est facile, par des considérations géométriques assez simples, de vérifier ce fait au degré de précision que comporte la détermination d'un maximum au voisinage duquel la fonction varie toujours lentement. Le calcul permet de le retrouver exactement.

Si l'on appelle y la distance à l'axe focal d'une zone annulaire de largeur dy , l'intensité lumineuse due à cette partie de l'optique a pour valeur :

$$(1) \quad 2 \pi y. dy. e,$$

e étant la brillance moyenne de la surface.

Soit δ le diamètre de la source supposée sphérique, L la distance du but, la largeur du faisceau dans un plan passant par l'axe focal est :

$$(2) \quad \frac{\delta. L}{f + \frac{y^2}{4f}} = \frac{4 f. \delta. L}{y^2 + 4f^2}.$$

Multipliant (1) par (2) on obtient :

$$(3) \quad dU = 2\pi y \cdot d y \cdot e \cdot \frac{4f \cdot \delta \cdot L}{y^2 + 4f^2} = 8\pi f \cdot \delta \cdot L \cdot e \frac{y \cdot d y}{y^2 + 4f^2}.$$

Posant $K = 8\pi \cdot f \cdot \delta \cdot L \cdot e$, il vient :

$$(4) \quad dU = K \frac{y \cdot d y}{y^2 + 4f^2} = \frac{K}{4f^2} \frac{y \cdot d y}{\frac{y^2}{4f^2} + 1}.$$

L'aire de la caractéristique sera l'intégrale de cette fonction de 0 à y , en donnant à y comme valeur maximum le rayon de l'ouverture du réflecteur.

Posant $y = 2f \cdot z$, d'où $d y = 2f \cdot d z$, il vient :

$$(5) \quad dU = K \frac{z \cdot d z}{z^2 + 1},$$

dont l'intégrale est :

$$(6) \quad K \cdot \log \sqrt{z^2 + 1};$$

ou en remplaçant K par sa valeur $8\pi f \cdot \delta \cdot L \cdot e$,

$$(7) \quad U = 8\pi \cdot \delta \cdot L \cdot e \cdot f \cdot \log \sqrt{z^2 + 1}.$$

Désignant alors $8\pi \cdot \delta \cdot L \cdot e$ par a , l'on obtient :

$$(8) \quad U = a \cdot f \cdot \log \sqrt{z^2 + 1},$$

dont il faut déterminer le maximum en fonction de f ; prenons la dérivée :

$$(9) \quad \frac{dU}{df} = a \cdot f \cdot \frac{z}{z^2 + 1} \frac{dz}{df} + a \cdot \log \sqrt{\frac{y^2}{4f^2} + 1}.$$

Or :

$$(10) \quad \frac{z}{z^2 + 1} = \frac{\frac{y}{2f}}{\frac{y^2}{4f^2} + 1} = \frac{4f^2 y}{2f(4f^2 + y^2)} = \frac{2f \cdot y}{4f^2 + y^2}$$

et :

$$(11) \quad \frac{dz}{df} = \frac{-2y}{4f^2} = \frac{-y}{2f}.$$

Portant (10) et (11) dans (9), il vient :

$$(12) \quad \frac{dU}{df} = \frac{-a y^2}{4f^2 + y^2} + a \log \sqrt{\frac{y^2}{4f^2} + 1},$$

qui s'annule pour :

$$(13) \quad \log \sqrt{\frac{y^2}{4f^2} + 1} = \frac{y^2}{4f^2 + y^2},$$

équation qui, par tâtonnements, donne $f = 0,252 \, y$, correspondant à l'angle donné par Fresnel $126^{\circ}24'52''$.

Fresnel a bien spécifié qu'il fallait admettre que tous les points de la flamme envoient des rayons lumineux d'égale intensité dans tous les sens, et faire abstraction de l'ombre portée par le bec ; il a admis également que la source a même dimension dans chaque sens ; il s'est donc placé dans le cas d'une source sphérique de brillance uniforme, hypothèse qui est également à la base de la démonstration donnée plus haut. Il est facile de montrer que la brillance très variable de la flamme, les ombres portées par le brûleur et la cheminée de verre, les ouvertures nécessaires pour laisser passer la lampe et sa cheminée jouent un rôle très important, et une étude plus complète aurait montré l'avantage des réflecteurs plus plats.

Dans le mémoire du 22 juillet 1822 sur un nouveau système d'éclairage des phares, Fresnel admettait que les réflecteurs absorbent la moitié de la lumière sous des incidences peu obliques, telles que celles de la majeure partie des rayons dans les miroirs paraboliques.

Les lentilles à échelons. — Dans sa note d'août 1819, Fresnel traçait un programme d'expériences relatives au fonctionnement des lampes, puis il comparait les réflecteurs et les lentilles, disant : « Les réflecteurs, surtout quand ils sont peu « profonds, ont l'inconvénient de ne point utiliser une partie considérable des « rayons, et précisément ceux qui, plus rapprochés de la direction de l'axe, pour- « raient y être ramenés avec le moins de perte. La réfraction en fournit le moyen ». Et il exposait le projet d'une lentille en plusieurs morceaux.

Déjà en 1748, Buffon avait envisagé de construire une lentille à échelons en une seule pièce, l'abbé Rochon l'avait réalisée vers 1780, et en 1788 Condorcet, dans son éloge académique de Buffon, avait envisagé de la constituer de plusieurs morceaux.

Les premières lentilles construites par Fresnel étaient formées d'éléments droits ayant une face sphérique et ne ressemblaient pas beaucoup à la lentille de Buffon, dont toutes les surfaces actives devaient avoir même centre. Plus tard, lorsque Soleil père eut, avec les conseils de Fresnel, trouvé moyen d'usiner des anneaux, la ressemblance s'accrut. Jusqu'à cette époque, les opticiens n'avaient pas eu à construire de grandes lentilles ; il fallut créer de toutes pièces tout l'outillage nécessaire, aussi bien à la glacerie pour mouler les ébauches d'anneaux, que chez l'opticien pour les travailler ; cette création s'étendit sur plusieurs années et fut partagée entre plusieurs maisons d'optique dont la première fut créée par François Soleil et reprise par Louis Sautter. Plusieurs constructeurs

dans le monde purent ainsi revendiquer la priorité dans l'exécution des grands appareils ; ils eurent le mérite de mener à bien une construction qui n'avait pas été réalisée avant eux, mais ils ne firent pas, pour cela, une invention.

Leur comparaison avec les réflecteurs. — Dès les premiers essais, les lentilles donnant des faisceaux beaucoup plus intenses que les réflecteurs auxquels on les comparait, Fresnel et les constructeurs de réflecteurs eux-mêmes conclurent à la supériorité indiscutable des lentilles. On avait pris soin de comparer des réflecteurs et des lentilles ayant à peu près les mêmes dimensions ; tout le monde était convaincu que l'on comparait une lentille de construction peu précise à un réflecteur donnant le maximum d'effet utile : les lentilles donnaient une intensité 3 à 4 fois plus grande. A moins d'admettre que les réflecteurs étaient en mauvais état, une pareille différence ne peut être attribuée aux propriétés générales des réflecteurs et des réfracteurs, ni même à une exécution peu précise, et il est facile d'en indiquer la cause. Les lentilles ayant une faible ouverture, on pouvait placer les foyers des différents éléments dans la région la plus brillante de la flamme, et pour l'observateur éloigné la lentille avait partout le même éclat ; les réflecteurs ayant au contraire une grande ouverture, le foyer moyen étant placé sur l'axe de la flamme ou plus exactement sur l'axe du brûleur, l'observateur éloigné voyait dans le miroir une tache brillante, rappelant un peu la forme de la flamme, mais n'occupant qu'une partie de la surface apparente du réflecteur ; cet observateur apercevait : pour certaines régions les parties les plus brillantes de la flamme, pour d'autres régions les parties les moins éclairantes, pour d'autres enfin le corps du brûleur ou le vide central de la flamme ; les perforations du miroir, les ombres portées disparaissant en majeure partie dans les régions sombres que l'on vient de signaler. Si l'on avait comparé des optiques et des réflecteurs de distances focales voisines, l'écart n'aurait pu être aussi considérable et l'expérience faite avec des réflecteurs et des lentilles de construction récente donne le résultat inverse (1). Le seul avantage des miroirs creux était de donner une grande divergence, comme l'auraient fait des lentilles de même distance focale et l'on n'en tenait aucun compte.

Les marins ne furent pas toujours de cet avis et, quelques années après, Reynaud pouvait écrire : « La durée des éclats était plus considérable dans les phares à réflecteurs et ce mérite était fort apprécié par les marins (2). »

Les anneaux catadioptriques. — L'expérience ayant montré la supériorité de la lentille dioptrique, il fut admis par la suite que cette supériorité s'étendait aux anneaux catadioptriques qui utilisaient la réflexion totale.

La dispersion chromatique limite l'ouverture que l'on peut donner aux len-

(1) Jean Rey, *Comparaison d'une optique en verre et d'une optique à réflecteurs*.

(2) Reynaud, *Mémoire sur l'éclairage*, page 78.

tilles dioptriques et Fresnel avait choisi l'angle de 45° pour l'ouverture des lentilles de l'appareil du Phare de Cordouan. Pour utiliser la lumière qui passait à côté des lentilles, Fresnel créa successivement plusieurs dispositifs :

des miroirs renvoyant sur la lentille la lumière qu'ils réfléchissaient et créant des faisceaux auxiliaires en dessous du faisceau principal ;

des lentilles auxiliaires inclinées, dont le faisceau était renvoyé à l'horizon par des miroirs plans ;

des rangées de miroirs courbes, dont la méridienne devrait être un arc de parabole ;

enfin les anneaux catadioptriques, qui supplantèrent, par la suite, les autres dispositifs. L'anneau catadioptrique a une forme triangulaire et l'une de ses faces, la plus grande, agit comme un réflecteur.

L'appareil du Canal Saint-Martin. — En 1825, Fresnel fit construire pour l'éclairage des berges du Canal Saint-Martin un appareil qui contient un demi-appareil de feu d'horizon et deux demi-lentilles de feux à éclats, comportant chacun des anneaux dioptriques et des anneaux catadioptriques. Cet appareil, que l'on prendrait pour un modèle construit exprès pour la démonstration, montre comment le même profil engendre un feu à éclats par rotation autour de l'axe focal et un feu d'horizon par rotation autour d'un axe passant par le foyer et perpendiculaire à l'axe focal.

Pour avoir tous les éléments entrant dans la constitution des optiques de phares, il suffit d'ajouter :

les lentilles cylindriques que Fresnel connaissait ;

le réflecteur catadioptrique qui dérive des anneaux catadioptriques ;

les écrans en verres colorés ;

l'écran de Lemoyne qui sert à produire les occultations de courte durée ;

la machine de rotation, que Fresnel avait perfectionnée en y introduisant le volant pendule.

Les divers feux. — L'association de ces divers éléments a permis de produire :

des feux d'horizon fixes et à occultation ;

des feux de direction ;

des feux à éclats à groupes simples ou complexes ;

des feux fixes variés par des éclats ;

des feux à éclats prolongés ;

des feux à éclats alternativement courts et longs ;

et, dans chaque cas, des feux blancs, des feux colorés, des feux blancs dans certaines directions, colorés par ailleurs ; des feux ayant des secteurs de diverses colorations.

Lors des essais du 20 août 1822, l'appareil destiné au Phare de Cordouan donnait des éclats d'une durée de 15 secondes, séparés par des éclipses de 45 secondes. Lorsqu'il fut installé, il donnait des éclats d'environ 10 secondes, se re-

produisant de minute en minute. Pour créer un caractère nouveau, Fresnel indiqua des appareils comportant 16 demi-lentilles, qui donnaient des éclats ayant même durée, mais se reproduisant toutes les demi-minutes.

Par la suite, certains appareils furent munis de 24 lentilles étroites, pour donner des éclats de 15 en 15 secondes, d'une durée un peu plus courte, mais cependant encore assez longue pour permettre le relèvement sur un seul éclat. C'est en effet ce critérium qui fut admis pendant longtemps.

Les éclats de beaucoup d'appareils étaient prolongés par des décalages des différentes parties de l'optique, ou se superposaient à un feu fixe important.

Les progrès ont consisté à construire des appareils de plus en plus grands, à leur adapter les nouveaux modes d'éclairage au fur et à mesure de leur apparition.

Perfectionnement des optiques. Les feux scintillants. Les feux-éclairs. — Deux types d'appareils méritent plus spécialement de retenir l'attention : les feux scintillants, les feux-éclairs, dont les créateurs tentèrent d'apporter une nouvelle solution au problème si bien posé par Fresnel dans un mémoire de 1820 :

« La vivacité de la lumière est une qualité aussi essentielle que sa durée dans un feu tournant. Je crois même qu'on doit la placer au premier rang ; car une lumière trop faible ne serait pas aperçue, quelle que fût la durée de l'éclat, tandis qu'une lumière vive pourrait l'être, quoique passant avec une grande rapidité... Malheureusement il est difficile de décider jusqu'à quel point on doit sacrifier l'intensité à la durée, ou la durée à l'intensité. »

Par leur construction, les feux scintillants étaient des appareils à 24 panneaux, dont la vitesse de rotation avait été augmentée pour que les éclats se succèdent à 4 secondes d'intervalle. Du point de vue théorique ils marquaient une étape importante : les éclats n'étaient plus assez longs pour permettre le relèvement sur un seul éclat, mais le relèvement était facile sur une suite d'éclats dont la durée était le tiers de la durée totale. Allard a donné une étude théorique de la vision des feux scintillants (1) qu'il avait créés, surtout en vue d'obtenir un caractère nouveau (2). Quelques années plus tard, Bourdelle s'appuyant sur les travaux de Bloch et de Charpentier (3), réduisait à 1/10 de seconde la durée des éclats des feux-éclairs : cette durée paraissant suffisante pour obtenir la perception intégrale des éclats, il pouvait sembler inutile de donner à l'éclat une durée plus longue. Cette réduction de la durée de l'éclat s'obtenait facilement en augmentant la vitesse de rotation de l'optique montée sur un flotteur, plongé dans une cuve remplie de mercure. Par elle-même cette réduction aurait plutôt été nuisible, mais Bourdelle avait en vue de diminuer le nombre des

(1) Allard, *Mémoire sur l'intensité et la portée des phares*, pages 62 et suivantes.

(2) Allard, *Mémoire sur l'intensité et la portée des phares*, page 56.

(3) Dr A. Charpentier, *Persistence des impressions rétiniennes et excitations de courte durée*.

lentilles, ce qui permettrait d'augmenter l'intensité de chaque faisceau et par suite la portée. Une Commission nautique (1) chargée en 1886 d'examiner différentes questions relatives à l'éclairage électrique se livra à une enquête détaillée, à des vérifications nombreuses, à des mesures d'angles et de relèvements et adopta cette conclusion : « La durée des éclats peut être réduite dans une mesure « quelconque, à condition que les éclats se reproduisent au moins toutes les « 5 secondes. »

Pour chaque ordre d'appareils, ordre caractérisé par la distance focale, on employait de préférence toujours la même dimension de lampe, définie par le nombre de mèches concentriques qu'elle comportait. Le diamètre de la source de lumière et la distance focale déterminaient la divergence des appareils d'un même ordre ; la durée de l'éclat fixée à 0,1 seconde déterminait à son tour la vitesse de rotation et par suite le nombre de lentilles nécessaire pour avoir un écart entre éclats inférieur à 5 secondes. On pouvait construire des appareils de 3^e ordre ou d'ordre inférieur munis d'une seule lentille de 180° faisant 12 tours à la minute ; des appareils de tous ordres munis de deux lentilles de 180° faisant 6 tours à la minute. Ces nouveaux appareils, appelés Feux-éclairs, auraient eu des puissances photométriques environ 4 fois supérieures à celles des appareils à huit lentilles et auraient presque doublé les portées par temps très clair. Depuis Fresnel on n'avait pas eu à enregistrer un semblable progrès ; par prudence, on construisit surtout des appareils à quatre lentilles, donnant déjà des intensités doubles de celles auxquelles on était habitué, se réservant de construire par la suite des appareils à deux lentilles, dont il n'existe que quelques exemplaires.

Lorsqu'on substitua aux brûleurs à plusieurs mèches des manchons à incandescence de 30 mm de diamètre, les durées des éclats des appareils des premiers ordres furent unanimement déclarées trop brèves ; les durées obtenues avec les gros manchons de 55 et 85 mm parurent au contraire convenables. Cette expérience fut pour beaucoup dans l'abandon des appareils à une et à deux lentilles, qui auraient donné des éclats considérés comme trop brefs. Le système des feux-éclairs fut appliqué également aux phares électriques et il fallut donner aux lentilles une précision bien supérieure à celle qui était nécessaire dans les appareils utilisant de grosses sources lumineuses ; cela amena la création d'une méthode de contrôle optique plus sévère que les vérifications par calibres qui étaient employées.

Méthodes de contrôle. — Un arc électrique dont le cratère avait environ 3 mm de diamètre était placé au foyer de l'anneau que l'on voulait examiner ; un écran placé à 30 m recevait une tache annulaire brillante, dont la largeur ne devait

(1) Exposition de Chicago, Notice du Service des Phares, page 10.

pas excéder beaucoup la largeur théorique ; on éliminait les anneaux donnant une largeur supérieure à 30 cm. La même vérification pouvait se faire sur l'appareil entièrement monté ; elle était beaucoup plus sévère que les épreuves auxquelles on soumettait à la même époque les miroirs destinés aux projecteurs militaires. La méthode ne pouvait s'appliquer aux éléments dioptriques, par suite de la dispersion chromatique.

Le rendement des anneaux catadioptriques. — Malgré les progrès très réels que cette méthode de contrôle permettait de constater, les résultats obtenus étaient assez loin de ce que l'on attendait et Ribière, Ingénieur en chef du Service central des Phares et Balises, qui avait beaucoup contribué aux progrès réalisés, a pu écrire (1) : « Les mesures faites sur le faisceau de la partie catadioptrique donnaient « seulement les 2/5 de la puissance théorique. »

Les anneaux catadioptriques utilisés dans les phares ne peuvent pas, comme les prismes employés en optique, être assimilés à une lame à faces parallèles et il n'est pas très exact de dire que le coefficient de divergence est partout égal à 1 ; cependant des essais récents effectués sur plusieurs prismes de construction déjà ancienne ont montré de petites variations du coefficient de divergence produites par des défauts de surface, mais n'ont accusé aucune variation systématique. La vérification d'une optique de 3^e ordre faite à l'aide de la méthode du réseau utilisée pour le contrôle des miroirs de projecteurs (2) n'a montré aucun défaut important des anneaux catadioptriques, ni dans leur forme ni dans leur assemblage ; pour les parties dioptriques, elle n'a rien montré, à part la dispersion colorée. Des essais plus récents en lumière sensiblement monochromatique (Ecran Wratten, n° 73) ont montré que les anneaux dioptriques étaient beaucoup mieux corrigés de l'aberration de sphéricité que l'élément central, plus large que les autres.

Les nouveaux phares à réflecteurs. — Les premiers projecteurs militaires, introduits par Louis Sautter, avaient été construits avec des optiques de phares ; mais, dès l'apparition du miroir Mangin, l'optique lenticulaire fut rapidement abandonnée et par la suite plusieurs constructeurs de projecteurs proposèrent des phares munis de réflecteurs. Dès les premières années du xx^e siècle, le Phare de l'île d'Héligoland était équipé par l'Allemagne à l'aide d'un appareil constitué par quatre projecteurs à arc électrique ; on pouvait utiliser le projecteur placé au-dessus des autres et tournant très vite, ou les trois projecteurs du rang inférieur tournant à une vitesse réduite. Comme il est arrivé souvent, on fut surpris que ces appareils à éclats très brefs ne donnent pas la même portée que des appa-

(1) J. Rey, *Méthode de vérification des réflecteurs optiques.*

(2) Ribière, *Phares et Signaux maritimes*, bas de la page 183.

reils de feux fixes de même intensité et, en attendant d'avoir trouvé l'explication de ce fait, on ne construisit pas, en Allemagne, d'autres phares de ce système.

En 1913, Jean Rey publia une note sur un nouveau système de phares à réflecteurs métalliques constitué par des réflecteurs segmentés qui permettaient de donner aux phares toutes les apparences usuelles, sauf le feu d'horizon. Ce nouveau système fut l'occasion de travaux qui contribuèrent à établir la loi de Blondel et Rey (1) ; celle-ci permet de calculer le temps au bout duquel l'observateur percevra un feu dont on connaît la courbe des intensités en fonction du temps. Au cours des études de l'optique à quatre réflecteurs segmentés qui a été installée au phare construit sur l'îlot du Galiton au voisinage des côtes de Tunisie, on avait, par épure, déterminé la position qu'il fallait donner au manchon incandescent par rapport à chacun des réflecteurs, pour que les quatre éclats soient identiques ; pour éviter toute surprise, ces résultats furent vérifiés à l'aide d'une sorte de crible qui permet de déterminer expérimentalement les régions d'une optique illuminée par une lampe qui envoient de la lumière dans une même direction. Il est aisé de mesurer les aires qui correspondent à des directions repérées entre elles, de les multiplier par l'éclat moyen de la source et de tracer la caractéristique du faisceau (2).

Fresnel avait montré que les réflecteurs étaient, à son époque, plus lourds que les optiques, qu'ils avaient un mauvais rendement, qu'ils ne pouvaient être employés dans un appareil à plusieurs faisceaux ayant une seule lampe, qu'ils ne pouvaient utiliser tout le flux de la source ; enfin, il n'avait pu que constater la rapidité avec laquelle les surfaces argentées se noircissaient et se dépolissaient par les nettoyages.

Les réflecteurs actuels sont beaucoup plus légers que les optiques qu'ils pourraient remplacer, leur rendement est aussi élevé que celui de la partie dioptrique des optiques lenticulaires. Jean Rey a montré qu'ils pouvaient être employés dans une optique à plusieurs faisceaux n'ayant qu'une seule lampe et utiliser tout le flux de la source. La conservation en bon état des miroirs en verre argenté est facile pendant une longue période, mais aucune expérience ne permet de fixer le temps au bout duquel ces réflecteurs auraient perdu autant que les rares optiques lenticulaires vieilles d'un siècle et conservées depuis longtemps dans les musées.

Les dimensions de l'optique et l'éclat des sources.

Le système de Fresnel a permis depuis longtemps de construire des optiques de dimensions bien supérieures à celles des plus grands réflecteurs actuels et

(1) A. Blondel et J. Rey, *Sur la perception des lumières brèves à la limite de leur portée.*

(2) Jean Rey, *Prédétermination expérimentale en laboratoire de la caractéristique d'un phare à l'horizon.*

capables de donner des intensités lumineuses plus élevées. A puissance égale les réflecteurs ont des dimensions d'encombrement bien inférieures.

Les progrès des sources lumineuses ont souvent eu pour effet indirect de diminuer le volume des sources ; il en est résulté qu'il était moins nécessaire d'avoir de très grandes optiques. Les tubes luminescents ont, en général, des brillances faibles ; ils exigeraient des optiques de dimensions exagérées et on les emploie sans optiques. Les lampes à vapeur de mercure à très haute pression ont, à nouveau, des brillances élevées et utiliseront des optiques de dimensions modérées.

Vu et approuvé :

Paris, le 11 janvier 1938

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

CH. MAURAIN.

Vu et permis d'imprimer :

Le Recteur de l'Académie de Paris,

G. ROUSSY.

BIBLIOGRAPHIE

- Augustin FRESNEL. — Œuvres complètes, tome 3. Imprimerie Impériale. Paris, 1870.
- Léonce REYNAUD. — Mémoire sur l'éclairage et le balisage des côtes de France. Imprimerie Impériale. Paris, 1864.
- E. ALLARD. — Mémoire sur l'intensité et la portée des Phares. Imprimerie Nationale. Paris, 1876.
- E. ALLARD. — Les Phares. J. Rothschild. Paris, 1889.
- D^r A. CHARPENTIER. — Persistance des impressions rétinienne et excitations de courte durée. *Archives d'Ophthalmologie*. Paris, 1890.
- Service des Phares. Notice sur les appareils d'éclairage. Exposition Universelle de Chicago en 1893. Lahure. Paris, 1893.
- VEITMAYER. — Leuchtfeuer und Leuchtapparate. Oldenburg. Munich et Leipzig, 1900.
- BROCA et SULZER. — Sensation lumineuse en fonction du temps. *Journal de Physiologie et de Pathologie*, 1902.
- C. RIBIÈRE. — Phares et signaux maritimes. Doin. Paris, 1908.
- Jean REY. — Méthode de vérification des réflecteurs optiques. *C. R. de l'Académie des Sciences*. Tome 157, page 329 (Séance du 4 août 1913).
- A. BLONDEL et J. REY. — Sur la perception des lumières brèves à la limite de leur portée. *C. R. de l'Académie des Sciences* (Séance du 3 juillet 1911). *Journal de physique*. juillet et août 1911, pages 530 et 643.
- Jean REY. — Nouveau système de Phares à réflecteurs métalliques. Paris, 1913.
- LURIA et CATTOLICA. — Fari e Segnali marittimi. Simondetti. Turin, 1916.
- Jean REY. — Portée obtenue avec un phare de grand atterrage. *C. R. de l'Académie des Sciences*. Tome 174, page 289 (Séance du 30 janvier 1922).
- Jean REY. — Application de la loi Blondel-Rey à la détermination des optiques les plus favorables pour les feux à éclats. Note présentée à la Réunion officielle des Chefs de Service de l'Eclairage et du Balisage des Côtes à Londres, juillet 1929.
- A. MARSAT. — Sur les modes de représentation graphique de la répartition du flux émis par une source lumineuse. *C. R. de l'Académie des Sciences*. Tome 199, page 275 (Séance du 23 juillet 1932).
- A. BLONDEL. — Méthodes expérimentales pour la détermination de la portée des phares. *Revue générale de l'Electricité*, page 747, année 1933.
- A. BLONDEL. — Méthode nouvelle pour l'étude en laboratoire des faisceaux des appareils optiques. *C. R. de l'Académie des Sciences*, tome 188, page 1494 (Séance du 3 juin 1929).
-

